

## CAPÍTULO IV

### 4 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No capítulo 3 foi apresentada a metodologia proposta para o desenvolvimento de uma ferramenta de automação da resseção espacial de imagens com uso de hipóteses de rodovia como apoio de campo derivado do sistema de varredura Laser.

Neste capítulo será analisado o potencial de uso de hipóteses de rodovia na métrica desenvolvida para a solução do problema de correlação estrutural e também como apoio de campo para o processo de estimação dos parâmetros da orientação exterior da câmara.

Os experimentos realizados neste trabalho são divididos em duas etapas, ou seja, na primeira etapa serão realizados experimentos com dados simulados e na segunda etapa serão realizados experimentos com dados reais. Os experimentos com dados simulados consistem em avaliar o comportamento da métrica desenvolvida para o problema de correlação, no que tange o grau de verdadeiras correlações estabelecidas, bem como a potencialidade do uso de hipóteses de rodovias na estimação dos parâmetros de orientação exterior da câmara com o uso do IEKF.

É importante ressaltar que para avaliar os experimentos com dados simulados, as coordenadas do espaço-objeto foram coletadas diretamente da imagem de intensidade (dados bruto do Laser), e as geometrias interna e externa da câmara foram simuladas.

Na segunda etapa serão realizados experimentos para avaliar o comportamento da ferramenta no seu modo automático e semi-automático, ou seja, será avaliada toda a metodologia proposta aplicada com dados reais. Os experimentos com dados reais visam apresentar a eficiência e robustez da ferramenta implementada, bem como apresentar as deficiências da metodologia proposta.

#### 4.1 ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS COM DADOS SIMULADOS

A simulação dos dados apresenta uma situação ideal para o problema com a finalidade de conhecer o comportamento dos métodos empregados e consolidar a metodologia proposta. A metodologia proposta utiliza como observação (ou medidas), as feições retas que definem uma hipótese de rodovia plano no espaço-imagem. Os planos detectados são utilizados no processo de correlação estrutural e na estimação dos parâmetros de orientação exterior da câmara.

Para os experimentos com dados simulados é necessário simular um conjunto de três parâmetros:

- Parâmetros que definem cada feição reta ( $a$  e  $b$ );
- Parâmetros de orientação interior de uma câmara não métrica; e
- Parâmetros de orientação exterior verdadeiros para cada experimento em particular.

Para a simulação dos parâmetros das feições retas, foram coletadas manualmente as supostas hipóteses de rodovias na imagem de intensidade, e posteriormente foram calculados os parâmetros de cada feição reta projetadas no sistema de imagem (projetadas via colinearidade), bem como suas respectivas variâncias. Para a simulação dos parâmetros das feições retas, foram utilizadas as Equações (49) e (50), como segue (TOMMASELLI, 1993, pg. 80):

$$\begin{aligned} a &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \\ b &= \frac{y_1 \cdot x_2 - x_1 \cdot y_2}{x_2 - x_1} \end{aligned} \tag{49}$$

$$\begin{aligned} a^* &= \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \\ b^* &= \frac{x_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot x_2}{y_2 - y_1} \end{aligned} \tag{50}$$

Onde:

- $x_1, y_1, x_2, y_2$ : coordenadas dos pontos extremos de cada feição reta coletada, projetadas do espaço-objeto para o espaço-imagem, via equação de colinearidade e parâmetros de orientação exterior aproximados.

O cálculo das variâncias dos parâmetros das feições retas para as parametrizações horizontais e verticais são descritas por (TOMMASELLI, 1993, pg. 81):

$$\begin{aligned}\sigma_a^2 &= \frac{2(a^2 + 1)}{(x_2 - x_1)^2} \sigma_{xy}^2 \\ \sigma_b^2 &= \frac{x_2^2 - x_1^2}{(x_2 - x_1)^2} (a^2 + 1) \sigma_{xy}^2\end{aligned}\tag{51}$$

$$\begin{aligned}\sigma_a^{2*} &= \frac{2(a^{*2} + 1)}{(y_2 - y_1)^2} \sigma_{xy}^2 \\ \sigma_b^{2*} &= \frac{y_2^2 - y_1^2}{(y_2 - y_1)^2} (b^{*2} + 1) \sigma_{xy}^2\end{aligned}\tag{52}$$

onde:

- $\sigma_a^2, \sigma_b^2$ : variância dos parâmetros  $a$  e  $b$ ;
- $\sigma_a^{2*}, \sigma_b^{2*}$ : variância dos parâmetros  $a^*$  e  $b^*$ ; e
- $\sigma_{xy}^2$ : variâncias dos pontos  $x$  e  $y$ .

Para a simulação dos parâmetros de orientação interior da câmara, considerou-se o sistema de lentes isento de erros sistemáticos. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de orientação interior considerados na simulação dos dados referentes a geometria interna da câmara digital.

TABELA 1 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR SIMULADOS.

DISTÂNCIA FOCAL (mm)	xpp (mm)	ypp (mm)	K1	K2	K3	P1	P2	A	B
10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Os parâmetros de orientação exterior verdadeiros da câmara foram simulados para cada experimento em particular, e serão apresentados de acordo com cada experimento. Os experimentos com dados simulados foram divididos em três grupos, que abrangem as seguintes situações:

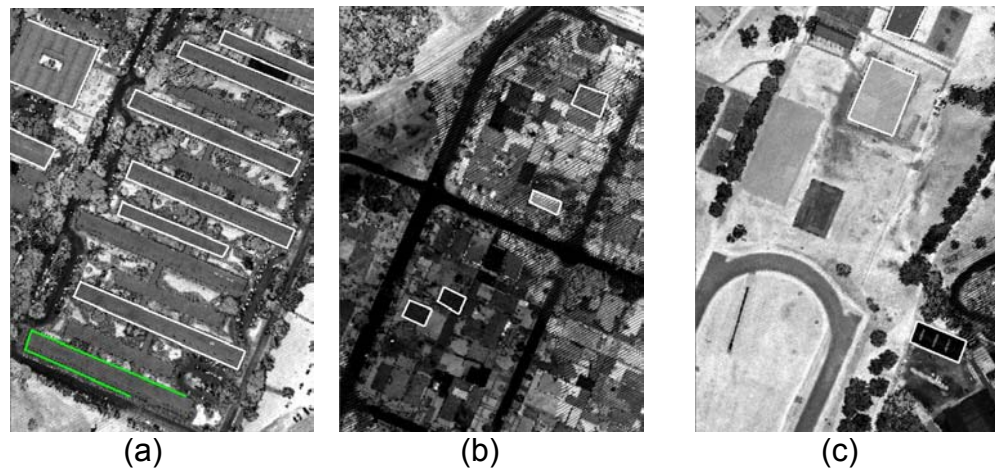
- **Grupo 1:** Objetos de apoio de campo derivados da imagem de intensidade, coletados sobre as edificações;
- **Grupo 2:** Planos de apoio de campo, coletados sobre rodovias, definindo hipóteses de rodovias; e
- **Grupo 3:** Planos de apoio de campo, coletados sobre as edificações, as quadras e as rodovias.

É importante lembrar que, as figuras planas representam hipóteses de objetos, podendo os mesmos ser de rodovias, edificações ou quadras.

#### 4.1.1 Análise dos experimentos do grupo 1

As feições retas foram coletadas manualmente na imagem de intensidade, de forma a definir figuras planas sobre os telhados das edificações. A Figura 27 apresenta algumas regiões, onde as feições retas foram coletadas de acordo com a característica do experimento.

FIGURA 27 – FIGURAS PLANAS COMO APOIO DE CAMPO COLETADOS MANUALMENTE NA IMAGEM DE INTENSIDADE.



Como pode ser visualizado na Figura 27, as figuras planas possuem diferentes formas, isto é, alongados, retangulares, quadrados, de grande e pequeno porte, dependendo do tamanho das edificações.

Nas Figuras 27a, 27b e 27c, são apresentados os agrupamentos formados por figuras planas (hipóteses) como apoio de campo, coletados manualmente sobre a imagem de intensidade. Para o experimento do grupo 1 foram admitidos como parâmetros de orientação exterior verdadeiros os valores apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR VERDADEIROS.

<b>Parâmetros de Orientação Exterior Verdadeiros</b>					
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$ (m)	$Y_0$ (m)	$Z_0$ (m)
112° 21'50"	0° 49'39"	-1° 28'27"	677607.705	7813723.953	1651.643

Na concepção de valores aproximados para os parâmetros de orientação exterior, pode-se considerar a determinação dos mesmos por meio de voo apoiado ou integração de sensores GPS/Inercial e câmara (MAGRO E ANDRADE, 1999 *apud* DAL POZ, 1999). Entretanto, para avaliar a capacidade de recuperação dos parâmetros do método foram utilizadas precisões entre 10 e 30 m para as posições da câmara e 3° e 3,5° para as rotações da câmara. A Tabela 3 apresenta os

parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões adotadas neste experimento.

TABELA 3 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 1, GRUPO 1.

Atitude (rad)			Posição (m)		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
2,0039	0,06091	-0,06776	677637	7183753	1681
Precisões					
0,06	0,06	-0,06	30	30	30

O método proposto se divide em cinco etapas:

- **Primeira etapa:** projeção, via colinearidade, dos pontos extremos de cada feição reta coletada no espaço-objeto para o espaço-imagem;
- **Segunda etapa:** definição da janela de restrição;
- **Terceira etapa:** estabelecimento de correlações;
- **Quarta etapa:** estimação dos parâmetros de orientação exterior; e
- **Quinta etapa:** controle de qualidade.

Para a realização da primeira etapa, todos os pontos extremos de cada feição reta coletada no espaço-objeto foram projetadas para o espaço-imagem com a finalidade de simular as feições retas no espaço-imagem. Consequentemente, foram calculados a partir das Equações (49), (50), (51) e (52), os parâmetros da reta ( $a$  e  $b$ ), bem como suas respectivas variâncias.

De acordo com o modelo matemático dos planos equivalentes (Eqs. 28 e 31), a relação entre feições retas no espaço-imagem e no espaço-objeto não carece ser estabelecida ponto-a-ponto, uma vez que é necessário apenas um ponto extremo qualquer da feição reta coletada ou extraída no espaço-objeto e os cossenos diretores que definem sua direção. Desta forma, a Tabela 4 apresenta um resumo dos parâmetros das feições retas simuladas, sua parametrização (H-Horizontal ou V-Vertical), suas respectivas variâncias ( $\sigma_a^2 / \sigma_{a*}^2$  e  $\sigma_b^2 / \sigma_{b*}^2$ ), e as

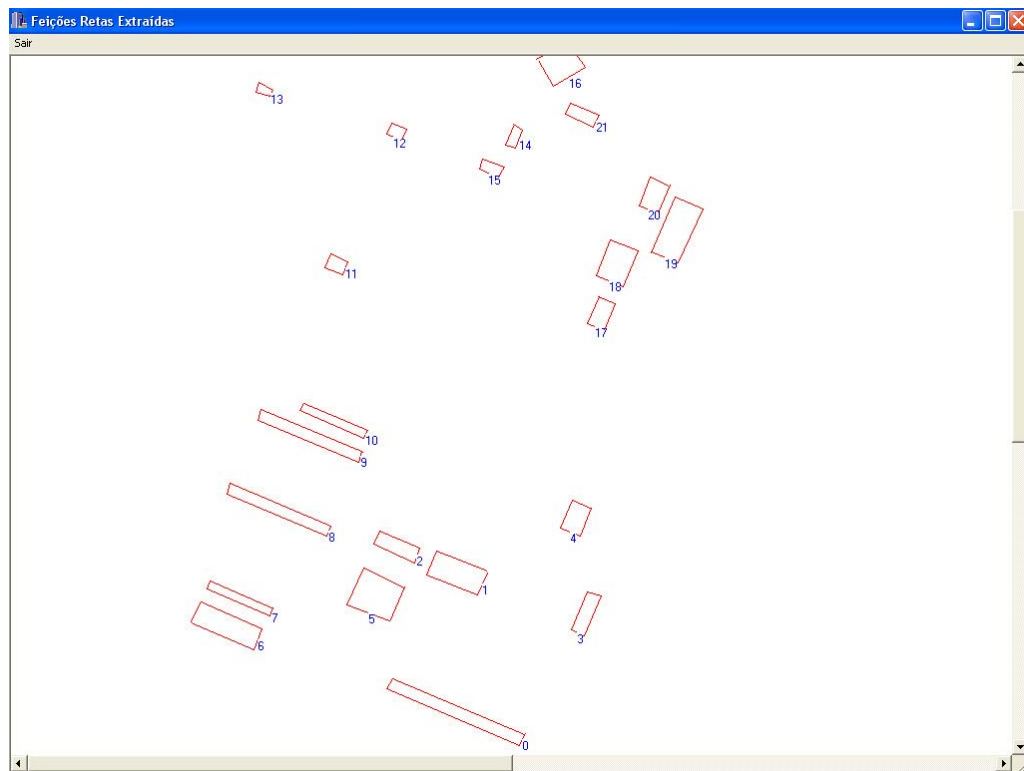
coordenadas ENH de um dos pontos extremos da feição reta coletada no espaço-objeto, bem como seus respectivos cossenos diretores.

TABELA 4 – PARÂMETROS DA RETA, SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES, PONTOS EXTREMOS DAS FEIÇÕES RETAS COLETADAS NO ESPAÇO-OBJETO E OS COSSENOS DIRETORES.

retas	H / V	a/a*	b/b* (mm)	$\sigma_a^2 / \sigma_{a*}^2$	$\sigma_b^2 / \sigma_{b*}^2$ (mm)	E (m)	N (m)	H (m)	l	m	n
<b>Plano – 0</b> (ver Figura 35)											
0	H	-0,879	4,923	2,13e-06	1,94e-04	677484,85	7184089,88	904,65	0,451	0,891	-0,0164
1	V	1,008	-6,023	2,13e-08	1,39e-05	677490,61	7184101,25	904,44	0,919	-0,392	0,004
2	H	-0,461	3,146	2,08e-06	3,82e-04	677623,89	7184044,42	905,07	-0,412	-0,678	0,607
3	V	1,062	-6,084	2,47e-08	1,51e-05	677617,72	7184034,26	914,17	-0,918	0,390	-0,066
<b>Plano – 1</b>											
4	H	-0,998	3,055	6,80e-07	1,72e-05	677522,17	7183928,06	915,77	0,398	0,917	0,00
5	V	1,046	-3,860	1,54e-07	2,51e-05	677532,12	7183950,99	915,78	0,930	-0,365	-0,031
6	H	-1,107	1,893	7,35e-07	2,77e-05	677583,35	7183930,86	914,02	-0,358	-0,928	-0,097
7	V	1,012	-3,238	1,41e-07	2,17e-05	677573,87	7183906,3	911,44	-0,924	0,373	0,074

No experimento 1 do Grupo 1, foram coletados 22 planos na imagem de intensidade. A Figura 28 apresenta a distribuição dos planos simulados no espaço-imagem.

FIGURA 28 – DISTRIBUIÇÃO DOS PLANOS SIMULADOS NA IMAGEM DIGITAL – GRUPO 1.



Finalmente tem-se um conjunto de figuras planas definidas no espaço-imagem e no espaço-objeto. Para o estabelecimento automático das correlações, as figuras planas coletadas no espaço-objeto devem ser projetadas para o espaço-referência (compatível com o espaço-imagem). Este processo é realizado com auxílio das informações dos parâmetros de orientação exterior aproximados, equação de colinearidade (Eq. 15) e propagação de covariâncias. As propagações de covariâncias permitem o cálculo dos erros de projeções, que são utilizados para construir uma janela de restrição, com finalidade de redução de custo computacional e evitar o estabelecimento de falsas-correlações.

Com o uso do conjunto de informações simuladas e calculadas foram estabelecidas automaticamente as correlações entre os planos no espaço-imagem e no espaço-referência.

Para este experimento, com a finalidade de analisar o comportamento das relações entre as figuras planas, a janela de restrição não foi utilizada no processo. A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados encontrados no processo de correlação baseado em atributos.



TABELA 5 – RESUMO DOS RESULTADOS DO PROCESSO DE CORRELAÇÃO.

Correlações estabelecidas (Imagem-referência)	Grau de correlação
$P_i^0 / P_r^0$	98
$P_i^2 / P_r^2; P_i^4 / P_r^4; P_i^6 / P_r^6; P_i^8 / P_r^8; P_i^{10} / P_r^{10}; P_i^{12} / P_r^{12};$ $P_i^{14} / P_r^{14}; P_i^{16} / P_r^{16}; P_i^{18} / P_r^{18}; P_i^{20} / P_r^{20}; P_i^{22} / P_r^{22}$	100
$P_i^7 / P_r^8; P_i^6 / P_r^{16}; P_i^3 / P_r^{17}; P_i^6 / P_r^{17}$	95

Considerando, por exemplo,  $P_i^0 / P_r^0$  a correlação estabelecida entre uma figura plana no espaço-imagem e seu homólogo no espaço-referência, a medida que as correlações são estabelecidas, o conjunto das observações que definem uma figura plana no espaço-objeto ( $E_{pj}^{fi}$   $N_{pj}^{fi}$   $H_{pj}^{fi}$   $l_{pj}^{fi}$   $m_{pj}^{fi}$   $n_{pj}^{fi}$ , sendo  $fi$  o número da feição reta que define a figura plana  $j$ , sendo  $i=0, \dots, 3$  e  $j=0, \dots, n$ ), e sua figura plana homóloga no espaço-imagem ( $2*[a/a^*]; 2*[\sigma_a^2 / \sigma_{a^*}^2]; 2*[b/b^*]; 2*[\sigma_b^2 / \sigma_{b^*}^2]$ ), são armazenadas no vetor e na MVC das observações ( $lb$  e  $\Sigma^{lb}$ , respectivamente), e utilizados na estimação dos parâmetros de orientação exterior.

É importante ressaltar que, a medida que o processo de estimação encontra a solução, os parâmetros de orientação exterior aproximados são atualizados e o desempenho do processo de correlação tende a melhorar. A Tabela 6 apresenta os parâmetros de orientação exterior ajustados a partir do método IEKF e do Método Paramétrico com Injunções de Posição.

TABELA 6 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 1, GRUPO 1.

Método proposto		Desvio-padrão	Método Paramétrico		Desvio-padrão
$\kappa_{\text{rad}}$	1,9514	0,00003155	$\kappa_{\text{rad}}$	1,95142	0,000022132
$\varphi_{\text{rad}}$	0,007895	0,000076144	$\varphi_{\text{rad}}$	0,007959268	0,000050393
$\omega_{\text{rad}}$	-0,01594	0,000060043	$\omega_{\text{rad}}$	-0,01571709	0,000039986
$X_0 \text{ (m)}$	677608,34	0,066611	$X_0 \text{ (m)}$	677608,50	0,044095
$Y_0 \text{ (m)}$	7813723,50	0,046999	$Y_0 \text{ (m)}$	7183723,50	0,031364
$Z_0 \text{ (m)}$	1650,73	0,1671	$Z_0 \text{ (m)}$	1651,36	0,11256
<b>ERROS VERDADEIROS</b>					
IEKF – Parâmetros Verdadeiros			Paramétrico – Parâmetros Verdadeiros		
$\kappa_{\text{rad}}$	0,00014		$\kappa_{\text{rad}}$	0,00012	
$\varphi_{\text{rad}}$	0,00065		$\varphi_{\text{rad}}$	0,00059	
$\omega_{\text{rad}}$	0,000533		$\omega_{\text{rad}}$	0,000303	
$X_0 \text{ (m)}$	0,99		$X_0 \text{ (m)}$	0,759	
$Y_0 \text{ (m)}$	0,45		$Y_0 \text{ (m)}$	0,45	
$Z_0 \text{ (m)}$	0,91		$Z_0 \text{ (m)}$	0,28	

A medida que o IEKF converge é realizada uma análise estatística de todas as observações utilizadas no processo de estimação dos parâmetros. A técnica *data-snooping* foi utilizada para análise de detecção de erros grosseiros e validação da consistência do modelo matemático, bem como para identificar falsas-correlações estabelecidas. Como admite-se que o modelo matemático é compatível com as observações, foram analisados apenas os processos de detecção de erros grosseiros e de identificação de falsas-correlações.

A técnica *data-snooping* foi escolhida por possibilitar a detecção e localização de erros grosseiros em tempo real, ou seja, as observações são analisadas a medida que estão sendo processadas. Neste caso, observações evidadas de erros grosseiros são eliminadas do processamento.

Neste trabalho, um conjunto de quatro observações (definindo um plano), são utilizadas no processo de estimação dos parâmetros de orientação exterior.

Cada observação é analisada individualmente e caso não sejam detectados erros grosseiros em no mínimo três observações, o vetor dos parâmetros aproximados (vetor de estado predito) é atualizado, caso contrário o vetor não é atualizado. Em ambas as situações as observações são descartadas do vetor para a entrada de novas observações, para a estimação posterior. A Tabela 7 apresenta um resumo dos resultados obtidos na detecção de erros grosseiros e identificação de falsas correlações.

TABELA 7 – RESUMO DA DETECÇÃO DE ERROS GROSSEIROS E IDENTIFICAÇÃO DE FALSA-CORRELAÇÃO.

Correlação	Verdadeira (V) ou Falsa (F)	$S_{a/a^*}$	$S_{b/b^*}$	Número de iterações
$P_i^0 / P_r^0$	V	0,698	-0,075	4
$P_i^8 / P_r^8$	V	1,115	-0,319	2
$P_i^7 / P_r^8$	F	xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx
$P_i^{10} / P_r^{10}$	V	-1,434	-1,271	2
$P_i^{16} / P_r^{16}$	V	0,526	-0,751	2
$P_i^6 / P_r^{16}$	F	xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx
$P_i^{18} / P_r^{18}$	V	0,723	-1,159	2

Com uma análise da Tabela 5 pode-se dizer que, todas as correlações entre os planos homólogos foram estabelecidas. Ocorreu uma perda no primeiro estabelecimento de 2% no grau de correlação, devido ao uso de parâmetros aproximados iniciais. Porém, a partir da atualização do vetor de estado na estimação dos parâmetros, o grau de correlação obtida tornou-se maior.

Neste experimento, a falta da definição de atributos melhores definidos provoca o estabelecimento de falsas correlações, como por exemplo, entre os planos  $P_i^7 / P_r^8$  e  $P_i^6 / P_r^{17}$ , apresentados na Figura 28.

Da Tabela 6 pode-se afirmar que, os parâmetros de orientação exterior da câmara foram estimados pelo método proposto com sucesso. Os parâmetros  $\varphi$  e  $\mathbf{X}_0$  mostraram-se mais sensíveis e apresentaram um desvio maior.

O uso dos métodos de estimação IEKF e o método Paramétrico forneceram resultados compatíveis, mostrando a característica ótima do filtro de Kalman. Os resultados de menor erro verdadeiro foram apresentados pelo método Paramétrico com Injunção de Posição.

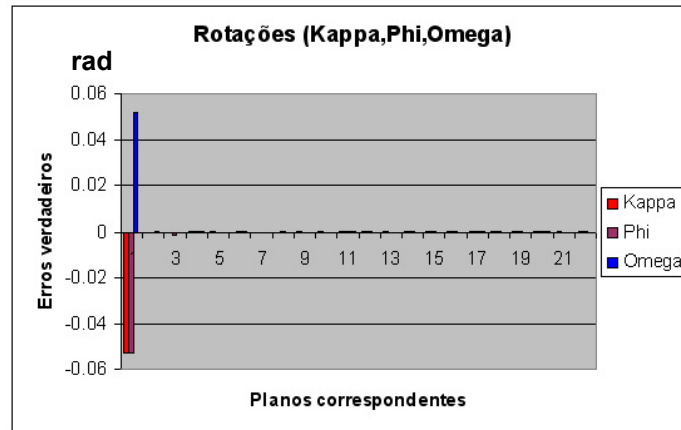
Em ambos os métodos de estimação, a MVC dos parâmetros foi superestimada, pois os desvios-padrão obtidos são menores que os erros verdadeiros (discrepância entre os parâmetros calculados e os considerados verdadeiros).

A Tabela 7 permite dizer que, todas as correlações atenderam os critérios de detecção de erros grosseiros, além de serem identificadas as falsas-correlações. Todas as verdadeiras correlações situaram-se no intervalo teórico estabelecido para o nível de significância de 5%, com um intervalo de  $[-1,89; 1,89]$ .

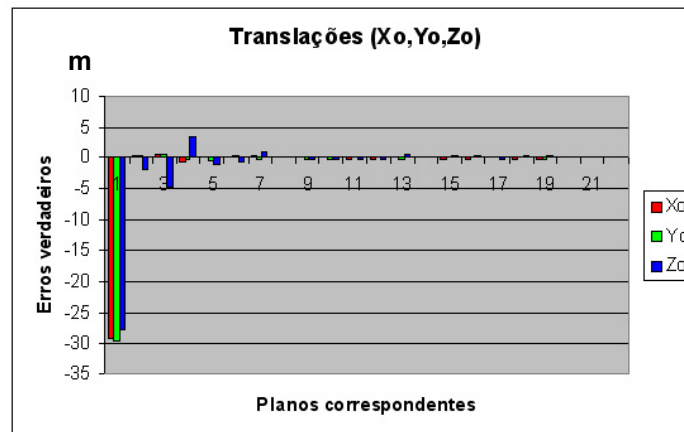
O número de iterações mostra que o método convergiu rapidamente a partir da 2ª correlação, além de forte relação com a estabilização do IEKF, ou seja, quanto maior a estabilidade menor o número de iterações. O número de graus de liberdade do processo de estimação igual a 2, mostra que a quantidade de observações necessárias para estimar os parâmetros no método proposto é inferior ao método por pontos.

Com a finalidade de apresentar o padrão de convergência dos parâmetros de orientação exterior da câmara no método proposto, o Gráfico 1 apresenta o padrão de convergência dos parâmetros de orientação exterior em função do número de planos correspondentes e o erro verdadeiro calculado.

GRÁFICO 1 – ESTABILIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR – EXPERIMENTO 1, GRUPO 1.



(A)



(B)

A análise visual do Gráfico 1 permite concluir que, o uso de figuras planas ou hipóteses de objetos bem definidos apresentou melhor desempenho para o padrão de convergência dos parâmetros, comparado ao processo de feição-a-feição.

O padrão de convergência dos parâmetros de rotação (Graf, 1a), apresentou-se mais rápido que os parâmetros de translação. Uma vez que, o padrão de convergência das rotações foi alcançado a partir da 2ª correlação e manteve-se linear até o final do processo de estimação.

Os parâmetros de translação  $X_0$  e  $Y_0$  obtiveram um padrão de convergência a partir da 3ª correlação, com céleres inversões até a 4ª e 5ª correlações, quando o método foi completamente estabilizado.

O parâmetro  $Z_0$  apresentou um padrão de convergência menos estável durante o processo de convergência do método, no qual na 2ª correlação

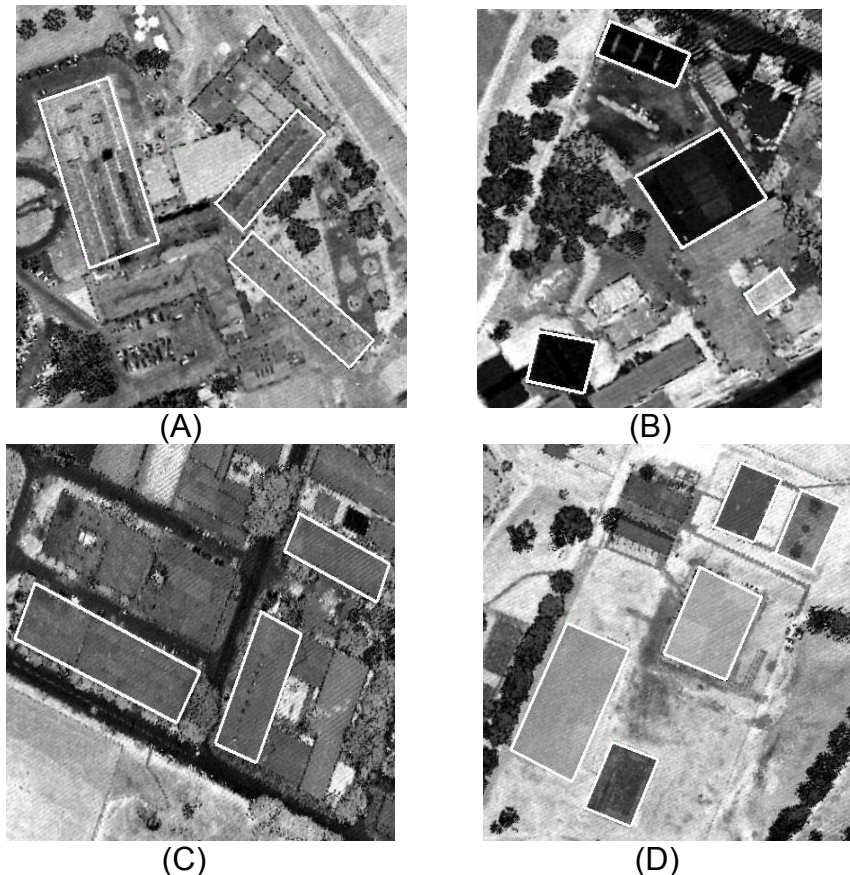
apresentou uma ligeira perturbação. Entretanto não afetou as demais correlações, apresentando um padrão de convergência a partir da 4ª correlação.

Apesar do parâmetro  $Z_0$  não acompanhar o padrão de convergência dos demais parâmetros de translação, não deturpou o processo de convergência para as demais correlações, mostrando que o uso figuras planas fortalece a rigidez geométrica.

O uso de figuras planas proporcionou maior consistência na estimação dos parâmetros, pois agrupamentos bem definidos no espaço-imagem e no espaço-referência proporcionam melhor definição geométrica para o problema.

Foi realizado um segundo experimento para o Grupo 01 e para a simulação dos dados deste experimento foram utilizados os mesmos parâmetros de orientação exterior verdadeiros do experimento 01. A Figura 29 apresenta os planos coletados manualmente pelo operador sobre as edificações apresentadas na imagem de intensidade.

FIGURA 29 – FIGURAS PLANAS COMO APOIO DE CAMPO COLETADOS MANUALMENTE SOBRE EDIFICAÇÕES.



As Figuras 29a, 29b, 29c e 29d, apresentam as figuras planas como apoio de campo coletados manualmente pelo operador sobre a imagem de intensidade. Os parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões utilizados para o experimento 2 do Grupo 1 são apresentados na Tabela 8,

TABELA 8 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 2, GRUPO 1.

Atitude (rad)			Posição (m)		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
2,0039	0,05733	0,06666	677427,	7183643,	1681,
Precisões					
0,06	0,06	0,06	30,	30,	30,

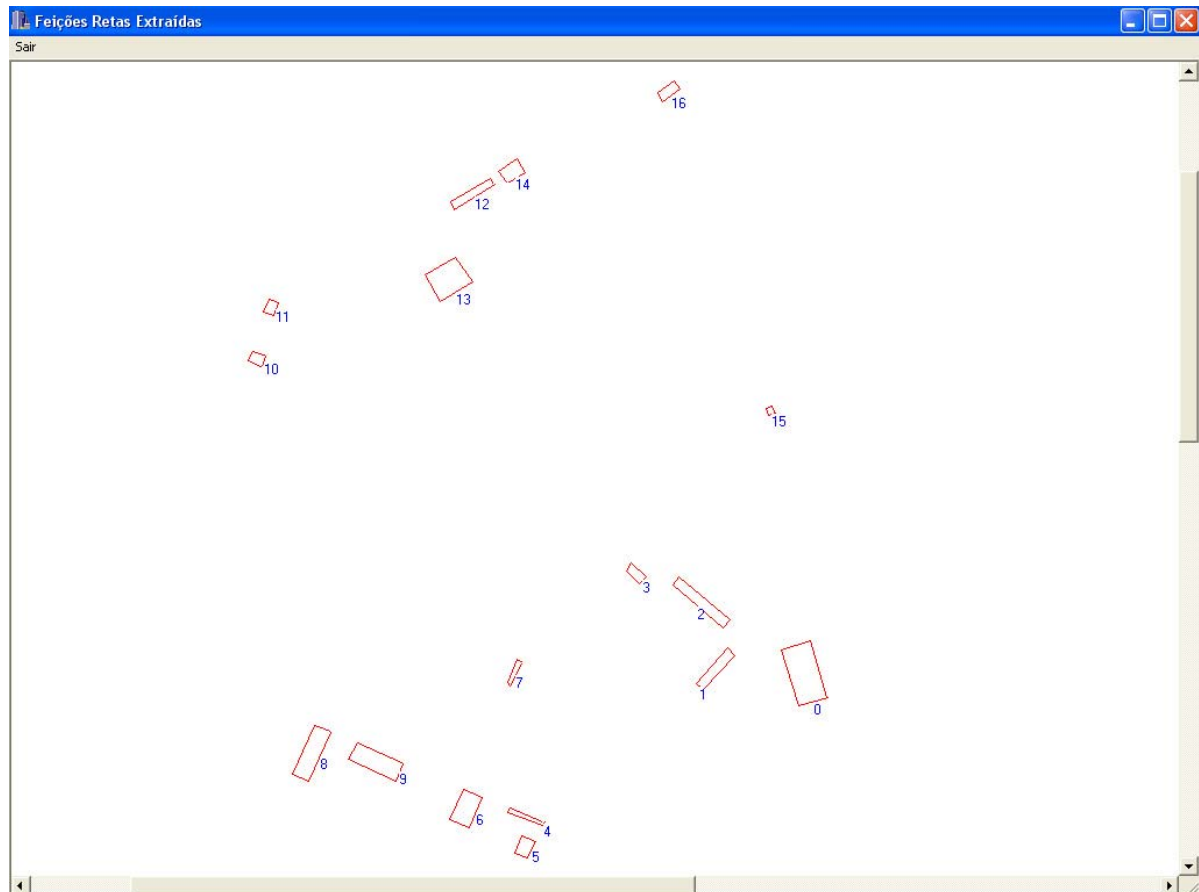
A Tabela 9 apresenta um resumo dos parâmetros das feições retas calculadas, sua parametrização, suas respectivas variâncias e as coordenadas ENH de um dos pontos extremos da feição reta coletada no espaço-objeto, bem como seus respectivos cossenos diretores.

TABELA 9 – PARÂMETROS DA RETA, SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES, PONTOS EXTREMOS DAS FEIÇÕES RETAS EXTRAÍDAS NO ESPAÇO-OBJETO E OS COSSENOS DIRETORES - EXPERIMENTO 2, GRUPO 1.

reta	H/ V	a/a*	b/b*	$\sigma_a^2 / \sigma_{a*}^2$	$\sigma_b^2 / \sigma_{b*}^2$	E (m) 670000	N (m) 7180000	H (m)	l	m	n
Plano -0 (ver Figura 37)											
0	V	11,23	-34,31	2,64e-03	2,68e-02	7122,23	3778,50	912,71	0,959	0,281	0,020
1	H	-12,16	31,05	9,47e-04	7,96e-02	7147,33	3785,86	913,25	0,298	-0,954	0,0
2	V	12,18	-29,04	3,65e-03	2,70e-02	7162,55	3737,19	905,07	-0,956	-0,289	-0,01
3	H	-10,00	29,51	4,38e-04	6,82e-02	7137,59	3729,64	912,83	-0,281	0,959	0,0
Plano -1											
4	V	0,53	-0,09	2,70e-06	6,92e-05	7229,51	3771,72	913,12	0,761	-0,644	0,05
5	H	-0,49	3,22	9,92e-08	6,98e-05	7235,89	3766,32	913,62	-0,663	-0,748	0,006
6	H	2,85	-2,73	1,10e-04	7,47e-04	7208,41	3735,30	913,91	-0,661	0,741	-0,111
7	H	-0,46	3,31	1,01e-07	7,77e-05	7202,08	3742,40	912,84	0,683	0,730	0,006

Neste experimento, foram coletados 17 planos e a Figura 30 apresenta a distribuição dos planos simulados no espaço-imagem.

FIGURA 30 – DISTRIBUIÇÃO DAS FIGURAS PLANAS SIMULADOS – EXPERIMENTO 2, GRUPO 1.



A Tabela 10 apresenta um resumo dos resultados encontrados no processo de correlação baseado em atributos.



TABELA 10 – RESUMO DOS RESULTADOS DO PROCESSO DE CORRELAÇÃO.

Correlações estabelecidas (Imagem-referência)	Grau de correlação (%)
$P_i^0 / P_r^0$	88
$P_i^2 / P_r^2; P_i^4 / P_r^4; P_i^6 / P_r^6; P_i^8 / P_r^8; P_i^{10} / P_r^{10}; P_i^{12} / P_r^{12};$ $P_i^{14} / P_r^{14}; P_i^{16} / P_r^{16}; P_i^{18} / P_r^{18}; P_i^{20} / P_r^{20}; P_i^{22} / P_r^{22}$	100
$P_i^6 / P_r^9; P_i^{10} / P_r^{11}$	78

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos com o uso do estimador IEKF.

TABELA 11 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 2, GRUPO 1.

Método proposto		Desvio-padrão		Parâmetros de orientação exterior verdadeiros		Erros verdadeiros
$\kappa$	1,95153	0,00005979		$\kappa$	1,951556	0,000026
$\varphi$	0,00596584	0,00016259		$\varphi$	-0,004981	0,00098
$\omega$	0,01426372	0,0002191		$\omega$	-0,014241	0,000022
$X_0$ (m)	677399,60	0,13852		$X_0$ (m)	677397,48	2,12
$Y_0$ (m)	7813612,95	0,16633		$Y_0$ (m)	7183613,74	0,79
$Z_0$ (m)	1652,12	0,61981		$Z_0$ (m)	1651,841	0,27

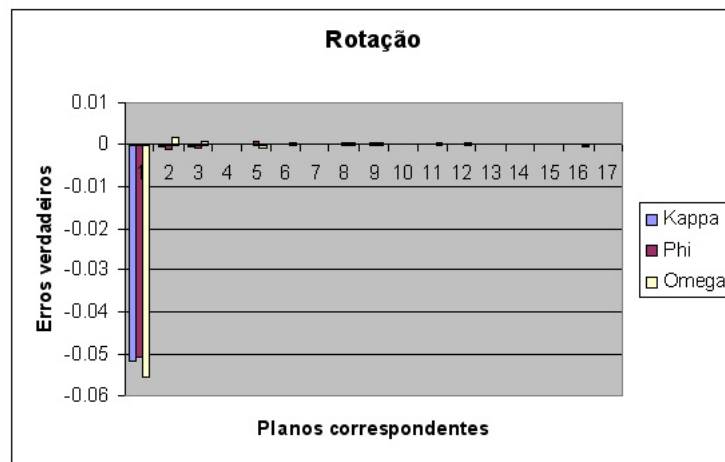
A Tabela 12 apresenta um resumo dos resultados obtidos tanto na detecção de erros grosseiros e na identificação de falsas-correlações.

TABELA 12 – RESUMO DA DETECÇÃO DE ERROS GROSSEIROS E IDENTIFICAÇÃO DE FALSAS-CORRELAÇÃO – EXPERIMENTO 2, GRUPO 1.

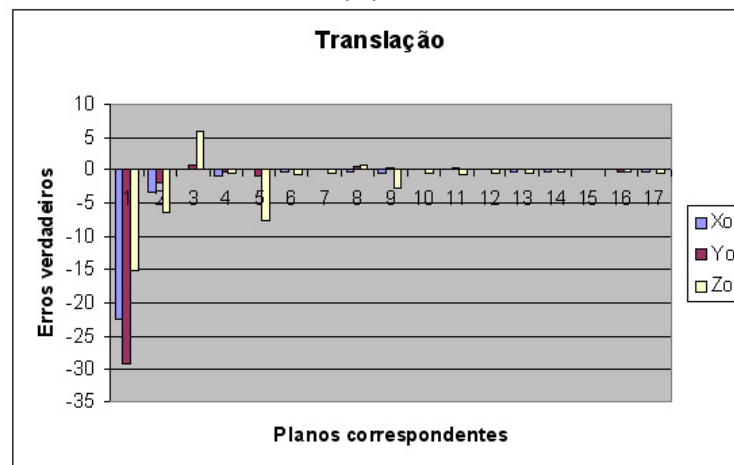
Correlação	Verdadeira (V) ou Falsa (F)	$S_{a/a^*}$	$S_{b/b^*}$	Número de iterações
$P_i^1 / P_r^1$	V	0,199328	0,084248	3
$P_i^3 / P_r^3$	V	0,073506	-0,358806	3
$P_i^5 / P_r^5$	V	0,275575	-0,118156	3
$P_i^7 / P_r^7$	V	0,123059	0,609190	3
$P_i^6 / P_r^9$	F	xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx
$P_i^9 / P_r^9$	V	0,123059	0,609190	4
$P_i^{10} / P_r^{11}$	F	xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx
$P_i^{11} / P_r^{11}$	V	-0,067348	1,408716	2
$P_i^{13} / P_r^{13}$	V	-0,246433	0,359611	2

O Gráfico 2 apresenta a visualização do padrão de convergência dos parâmetros de orientação exterior da câmara, em função do número de figuras planas correspondentes e o erro verdadeiro final.

GRÁFICO 2 – ESTABILIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR – EXPERIMENTO 2, GRUPO 1.



(A)



(B)

De acordo com a Tabela 10 pode-se dizer que, todas as correlações entre as figuras planas homólogas contidas no espaço-imagem e no espaço-referência foram estabelecidas. A primeira correlação foi prejudicada em 12%, causada pela entrada de parâmetros iniciais sem uma boa aproximação. A partir da convergência da estimação dos parâmetros, o grau de correlações estabelecidas foi total (100%).

Neste experimento, a janela de restrição foi acionada, porém falsas correlações foram estabelecidas ( $P_i^6 / P_r^9; P_i^{10} / P_r^{11}$ ), no entanto, o grau de correlação ficou próximo do limiar adotado para descartar falsas correlações (valor adotado: 75%), Como as figuras planas  $P_i^{10} / P_r^{11}$  são praticamente paralelas, a métrica proposta considerou os planos homólogos, porém com um grau de correlação muito próximo do limiar estabelecido.

Como não foram propostos atributos que parametrizam situações como a apresentada acima, a métrica não foi totalmente eficiente, pois estabeleceu as falsas correlações. Apesar de não terem sido implementados atributos que parametrizem algumas situações, o uso de figuras planas para a definição de atributos tornou o problema mais atraente.

Com os resultados obtidos e apresentados pela Tabela 11 pode-se concluir que, os resultados obtidos apresentaram-se próximos aos parâmetros verdadeiros simulados. Novamente, o maior erro verdadeiro encontrado para as rotações foi em  $\varphi$  e para as translações em  $\mathbf{X}_0$ . Os desvios-padrão dos parâmetros  $\kappa$  e  $\mathbf{Z}_0$  não foram superestimados, no entanto para os demais parâmetros ocorreu uma superestimação.

Em relação às análises estatísticas realizadas e apresentadas na Tabela 12 pode-se afirmar que, as falsas correlações estabelecidas foram identificadas e descartadas do processamento. Todas as correlações atenderam os critérios de detecção de erros grosseiros e na 9ª correlação, ocorreu uma ligeira inversão no processo de convergência, pois o número de iteração aumentou de 3 para 4 iterações.

Uma análise visual do Gráfico 2 permite concluir que, os parâmetros de rotação, obtiveram um padrão de convergência mais rápido que os parâmetros de translação. Ou seja, a partir da 2ª correlação os parâmetros de rotação da câmara se estabilizaram. Ocorreu uma ligeira inversão no parâmetro  $\omega$  na 2ª correlação, porém não afetou as demais correlações.

Os parâmetros de translação  $\mathbf{X}_0$  e  $\mathbf{Y}_0$  apresentaram um padrão de convergência a partir da 3ª correlação, com ligeiras inversões na 4ª e na 5ª, mas não houve influência no estabelecimento das demais correlações. O padrão de convergência de translação  $\mathbf{X}_0$  e  $\mathbf{Y}_0$  foi totalmente estabilizado a partir da 5ª correlação.

A convergência do parâmetro  $\mathbf{Z}_0$  novamente foi mais lenta, apresentando-se menos estável durante o processo de convergência do método, uma vez que somente a partir da 5ª correlação apresentou um padrão de convergência, com uma perturbação na 9ª correlação, fato que explica o aumento no número de iterações do IEKF descrito anteriormente. No entanto, os problemas apresentados não afetaram a estabilidade das demais correlações,

O comportamento descrito pelo Gráfico 2b, pode ser explicado ao observar o tamanho das figuras planas utilizadas no processo de estimação (Fig. 30). O modelo matemático utilizado foi concebido de forma que os dois vetores normais (vetor normal ao plano do espaço-imagem e vetor normal ao plano no espaço-objeto), sejam paralelos. Como, no início do processo de estimação foram utilizadas feições retas de pequeno porte (Fig. 30, figuras planas de número 10 e 11, por exemplo), ocorreu uma desestabilização da condição imposta pelo modelo matemático e consequentemente a convergência do método foi prejudicada,

No caso do experimento 1 do Grupo 1, os parâmetros apresentaram um padrão de convergência muito rápido, pois no início do processo foram utilizados planos de grande porte (Fig, 30, figuras planas 8 e 9, por exemplo). Neste experimento o uso de figuras planas como apoio de campo com pequeno porte não auxiliou efetivamente a rápida convergência do filtro.

#### 4.1.2 Análise dos experimentos do grupo 2

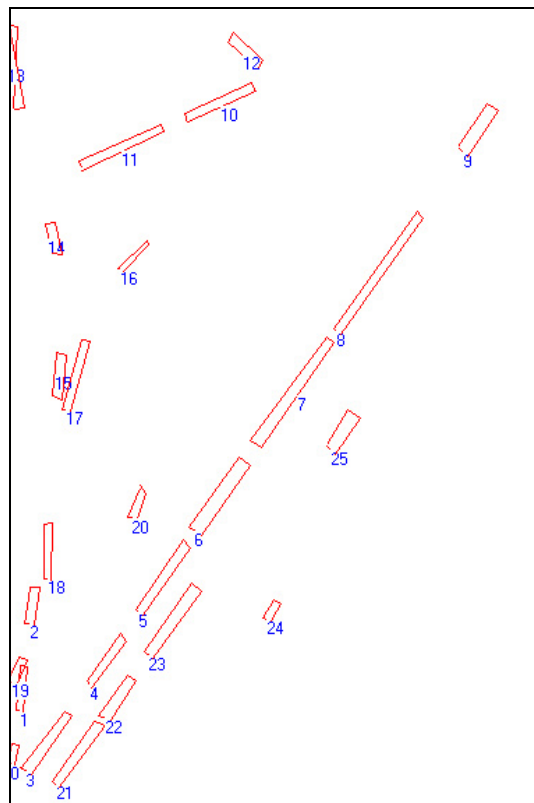
Neste experimento, foram coletados na imagem de intensidade, as figuras planas que definem as hipóteses de rodovia (objetos de interesse no processo automático da metodologia desenvolvida), e posteriormente simulados todos os dados necessários para a realização do respectivo experimento.

O objetivo deste experimento é avaliar o comportamento do método com uso de planos definidos ao longo de eixos de rodovias em diversas situações, tais como:

- Distribuição das hipóteses de forma quase homogênea na imagem digital;
- Distribuição das hipóteses de forma que cruzem a imagem digital no sentido transversal e diagonal ao plano da imagem;
- Distribuição das hipóteses de forma que cruzem a imagem digital no sentido diagonal ao plano da imagem; e
- Distribuição das hipóteses de forma que cruzem a imagem digital no sentido diagonal ao plano da imagem e com alguns planos distribuídos em torno da mesma.

Desta forma, é possível analisar o comportamento do método em relação à distribuição não homogênea e homogênea dos planos de apoio. A Figura 31 apresenta a distribuição dos planos simulados na imagem digital. As figuras planas descritas simulam hipóteses distribuídas de forma quase homogênea na imagem digital.

FIGURA 31 – DISTRIBUIÇÃO DAS FIGURAS PLANAS SIMULADAS – EXPERIMENTO 1, GRUPO 2.



A Tabela 13 apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões utilizados no experimento 1 do Grupo 2.

TABELA 13 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 1, GRUPO 2.

Atitude (rad)			Posição (m)		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
2,0011	-0,06753	-0,07643	678184,	7183990,	1677,
Precisões					
0,06	-0,06	-0,06	30,	-25,	30,

Neste experimento foram coletados 26 figuras planas como apoio de campo e a Tabela 14 apresenta um resumo dos resultados obtidos no processo de correlação de planos homólogos.

TABELA 14 – RESUMO DOS RESULTADOS DO PROCESSO DE CORRELAÇÃO – EXPERIMENTO 1, GRUPO 2.

Correlação Imagem-referência	Grau de correlação (%)
$P_i^0 / P_r^0 ; P_i^6 / P_r^6$	88,
$P_i^2 / P_r^2 ; P_i^8 / P_r^8 ; P_i^{10} / P_r^{10} ; P_i^{12} / P_r^{12}$	98,
$P_i^4 / P_r^4$	98,
$P_i^{16} / P_r^{16}$	76,
$P_i^{14} / P_r^{14}$	84,
$P_i^{18} / P_r^{18} ; P_i^{20} / P_r^{20} ; P_i^{22} / P_r^{22} ; P_i^{24} / P_r^{24}$	100,

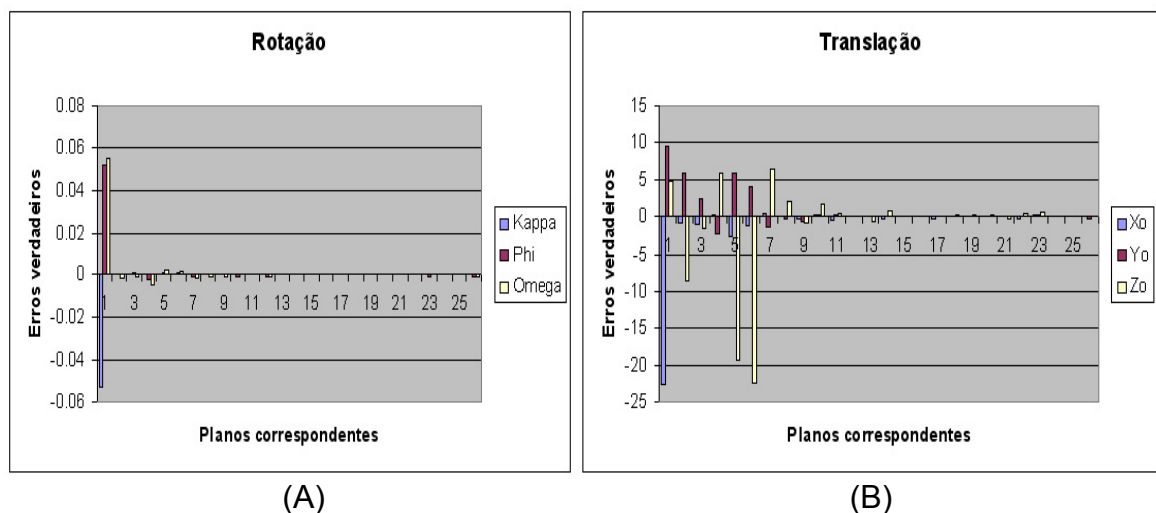
Os parâmetros de orientação exterior foram estimados a partir do método IEKF e a Tabela 15 apresenta os parâmetros de orientação exterior ajustados.

TABELA 15 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 1, GRUPO 2.

Método proposto		Desvio-padrão	Parâmetros de orientação exterior verdadeiros		Erros verdadeiros
$\kappa$	1,948883	0,00003197	$\kappa$	1,948828	0,000055
$\varphi$	-0,014498	0,000094227	$\varphi$	-0,015178	0,00068
$\omega$	-0,02373847	0,00011425	$\omega$	-0,024074	0,000336
$X_0$ (m)	678155,76	0,070947	$X_0$ (m)	678154,017	1,74
$Y_0$ (m)	7814014,80	0,09008	$Y_0$ (m)	7184015,546	0,74
$Z_0$ (m)	1647,30	0,42407	$Z_0$ (m)	1647,48	0,18

O Gráfico 3 apresenta a visualização da estabilização dos parâmetros em função do número de figuras planas correspondentes e os erros verdadeiros calculados em função dos parâmetros ajustados e os parâmetros considerados verdadeiros.

GRÁFICO 3 – ESTABILIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR – EXPERIMENTO 1, GRUPO 2.



De acordo com a Tabela 14 pode-se afirmar que, todas as figuras planas homólogas obtiveram correlações estabelecidas e a 16ª correlação apresentou grau de correlação muito baixa, para um valor de porcentagem com limiar adotado de



75%. A explicação é dada pelo fato que o 16º plano não está bem definido geometricamente, e prejudicou a determinação confiável de um dos atributos propostos para relacionar as figuras planas.

Analisando a Tabela 15 e o Gráfico 3, pode-se concluir que, o maior erro verdadeiro encontrado para as rotações foi no parâmetro  $\phi$  e para as translações o  $X_0$ . Até o momento pode-se verificar uma tendência para este tipo de resultado, pois em todos os experimentos anteriores o parâmetro  $\phi$  apresenta ligeiras perturbações de convergência e geometricamente é correlacionado com o parâmetro  $X_0$ .

Novamente as rotações obtiveram um padrão de convergência mais rápido que as translações. Os parâmetros  $\omega$  e  $\phi$  apresentaram ligeira perturbação na 3ª correlação, que por sinal não influenciou as demais correlações.

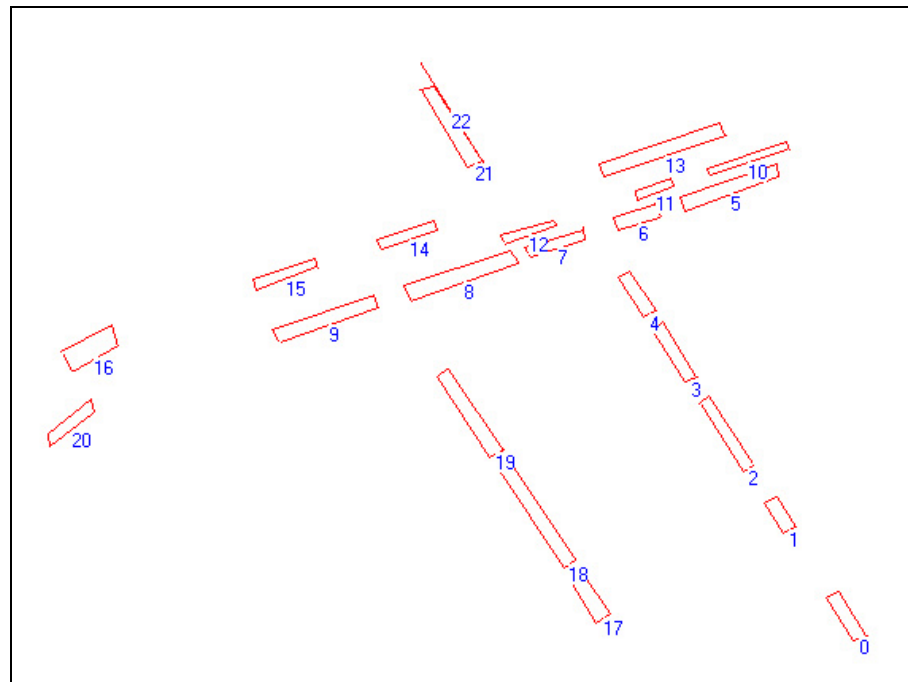
Os parâmetros  $X_0$  e  $Y_0$  apresentaram fortes perturbações na convergência do filtro, principalmente  $Y_0$ . Isto pode ser explicado pela distribuição dos planos de apoio não ser totalmente homogênea. Ou seja, não existe uma concentração de figuras planas ou hipóteses de rodovia na parte inferior direita da imagem, enfraquecendo a rigidez geométrica.

Este tipo de problema influencia a solução de correlação, pois fortes candidatas à correlação são prejudicadas no processo (por exemplo, a 16ª correlação, ver Tabela 13), uma vez que os parâmetros de orientação exterior não são devidamente atualizados. Na 15ª correlação ocorreu ligeira inversão no padrão de convergência. O fato explica o problema ocorrido no baixo grau de correlação obtida para a 16ª correlação.

Os parâmetros  $X_0$  e  $Y_0$  obtiveram um padrão de convergência somente após a 7ª correlação. Enquanto o parâmetro  $Z_0$  novamente apresentou dificuldade em estabelecer um padrão de convergência rápido, pois a distribuição dos planos de apoio desfavorece a posição da câmara, implicando numa variação acentuada do parâmetro  $Z_0$ .

Com a finalidade de compreender melhor o problema de distribuição das hipóteses de rodovia foi realizado um experimento, no qual a distribuição das hipóteses de rodovia cruzam a imagem digital no sentido transversal e na diagonal ao plano da imagem. A Figura 32 apresenta a distribuição das hipóteses de rodovia simuladas na imagem digital,

FIGURA 32 – DISTRIBUIÇÃO DAS HIPÓTESES DE RODOVIA SIMULADAS – EXPERIMENTO 2, GRUPO 2.



A Tabela 16 apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões utilizados no experimento 2 do Grupo 2.

TABELA 16 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 2, GRUPO 2.

Atitude (rad)			Posição (m)		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
5,4767	0,050430	0,0722	676831,	7183791,	1650,
Precisões					
0,060550	0,063686	0,06230	30,	30,	-10,

Neste experimento, foram coletados 22 figuras planas. A Tabela 17 apresenta um resumo dos resultados obtidos no processo de correlação e detecção de erros grosseiros.

TABELA 17 – RESUMO DOS RESULTADOS DO PROCESSO DE CORRELAÇÃO E DETECÇÃO DE ERROS GROSSEIROS – EXPERIMENTO 2, GRUPO 2.

Correlação	V ou F	Grau de correlação (%)	$S_{a/a^*}$	$S_{b/b^*}$	Número de iterações
$P_i^0 / P_r^0$	V	98,	-1,084866	0,940000	5
$P_i^2 / P_r^2$	V	98,	-0,006392	-0,230550	3
$P_i^4 / P_r^4$	V	98,	-0,022200	0,537602	3
$P_i^6 / P_r^6$	V	98,	-0,115877	0,337376	3
$P_i^8 / P_r^8$	V	98,	0,015976	-0,025743	3
$P_i^{10} / P_r^{10}$	V	98,	-0,010586	-1,668713	3
$P_i^{12} / P_r^{12}$	V	98,	-0,001912	0,259097	3
$P_i^{14} / P_r^{14}$	V	98,	0,013361	0,437726	2
$P_i^{16} / P_r^{16}$	V	98,	-0,499929	0,476272	2
$P_i^{18} / P_r^{18}$	V	98,	0,925019	0,338227	2
$P_i^{20} / P_r^{20}$	V	98,	0,065392	-0,169474	2
$P_i^0 / P_r^1; P_i^2 / P_r^4$	F	95	xxxxxxxxx	xxxxxxxxx	xxxxxxxxxxxxx
$P_i^{15} / P_r^{15}$	V	0	xxxxxxxxx	xxxxxxxxx	xxxxxxxxxxxxx

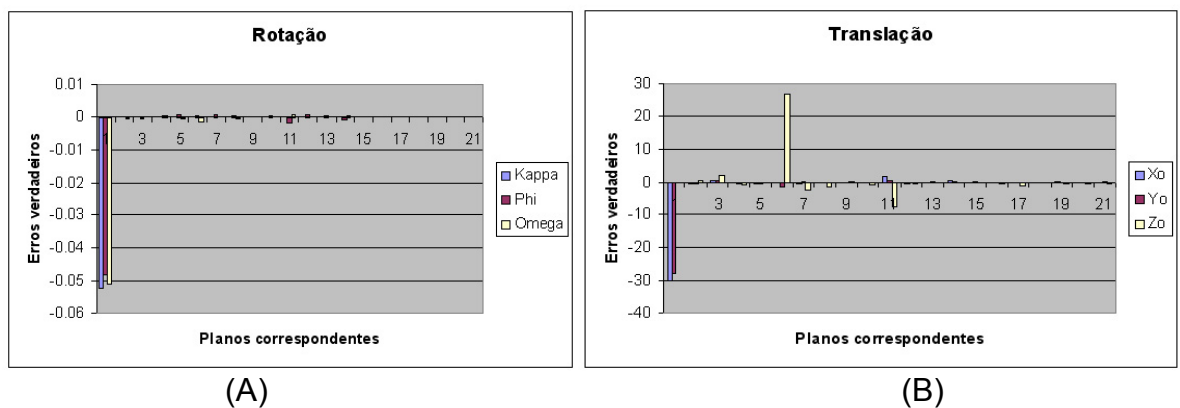
Os parâmetros de orientação exterior deste experimento, foram estimados a partir do método IEKF e são apresentados na Tabela 18.

TABELA 18 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 2, GRUPO 2.

Método proposto		Desvio-padrão	Parâmetros de orientação exterior verdadeiros		Erros verdadeiros
$\kappa$	5,431941	0,00003522	$\kappa$	5,424417	0,007524
$\varphi$	-0,00315764	0,00010714	$\varphi$	0,00430	0,001144
$\omega$	0,01846654	0,000089664	$\omega$	0,019873	0,0014064
$X_0$ (m)	676967,62	0,083291	$X_0$ (m)	676969,36	1,74
$Y_0$ (m)	7183871,84	0,069159	$Y_0$ (m)	7183871,94	0,1
$Z_0$ (m)	1660,27	0,88636	$Z_0$ (m)	1660,93	0,66

O Gráfico 4 apresenta o padrão de convergência dos parâmetros em função do número de planos correspondentes e o erro verdadeiro obtido em relação a diferença entre os parâmetros ajustados e os considerados verdadeiros, referente ao experimento 2 do grupo 2.

GRÁFICO 4 – PADRÃO DE CONVERGÊNCIA DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR – EXPERIMENTO 2, GRUPO 2.



De acordo com a Tabela 17 pode-se dizer que, não foi estabelecida a correlação entre as figuras planas  $P_i^{15} / P_r^{15}$ , pois ocorreram falhas no ganho da métrica desenvolvida. Por exemplo, no cálculo descrição relacional entre as figuras planas **9-15** no espaço-imagem e **9-15** no espaço-referência, houve uma

discrepância angular de magnitude igual a 20 para o primeiro atributo. Um fator explicativo do problema é o fato de que, as figuras planas se relacionam paralelamente e perpendicularmente, e como descrito anteriormente, os atributos definidos neste trabalho não parametrizam a situação descrita.

Novamente verificou-se que o número de iterações está fortemente relacionado com a estabilização do IEKF, pois quanto melhor a estabilidade menor o número de iterações.

Ao verificar a Tabela 18 pode-se afirmar que, o maior erro verdadeiro encontrado para as rotações foi em  $\kappa$ , enquanto que para as translações foi na coordenada  $X_0$ . A entrada de parâmetros aproximados deve ser feita cuidadosamente, principalmente para o parâmetro de rotação  $\kappa$ , pois em casos de rotação em  $\kappa$  muito grande em relação ao referencial de terreno (em torno de  $300^\circ$ ), o processo de correlação entre as observações nos espaços imagem e referência, tornam-se completamente inviável, não admitindo convergência para o método de estimação.

O Gráfico 4 mostra que, o padrão de convergência das rotações foi efetivamente revelado após a 3ª correlação. No entanto, ocorreram ligeiras perturbações do parâmetro  $\omega$  na 5ª correlação, devido a troca de sentido da orientação dos planos. Posteriormente, o parâmetro  $\phi$  também apresentou uma ligeira perturbação na 11ª correlação.

Os parâmetros  $X_0$  e  $Y_0$  apresentaram um padrão de convergência após a 2ª correlação, com ligeira perturbação do parâmetro  $X_0$  na 11ª correlação, juntamente com o parâmetro de rotação  $\phi$  por ambos serem correlacionados. Ou seja, uma rotação no parâmetro  $\phi$  influenciou o padrão de convergência do parâmetro  $X_0$ , ou vice-versa.

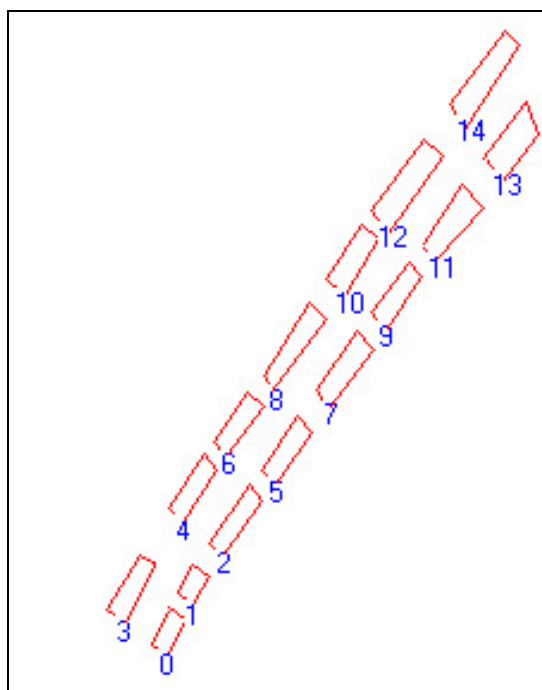
O parâmetro  $Z_0$  sofreu uma forte perturbação no seu padrão de convergência entre a 5ª e 6ª correlação. Isto pode ser explicado devido à mudança de posição das figuras planas de apoio influenciando fortemente na determinação do parâmetro, enfraquecendo a rigidez geométrica para a solução.

O uso de figuras planas como apoio de campo e com distribuição homogênea melhora consideravelmente o padrão de convergência, tanto para as rotações quanto para as translações. No entanto, ainda existe grande dificuldade de

convergência para o parâmetro  $Z_0$ . A tendência ocorrida nos experimentos anteriores, também aqui se confirmou pois o desvio-padrão do parâmetro  $Z_0$  não foi superestimado, porém seu padrão de convergência apresentou-se menos estável durante o processo de estimação.

Com o objetivo de atender ao terceiro experimento, que avalia o comportamento do método a partir de uma distribuição das hipóteses de rodovia de forma a cruzarem a imagem digital no sentido diagonal ao plano da imagem, a Figura 33 apresenta a distribuição dos planos simulados na imagem digital.

FIGURA 33 – DISTRIBUIÇÃO DAS FIGURAS PLANAS SIMULADAS – EXPERIMENTO 3, GRUPO 2.



Neste experimento, foram coletados 15 hipóteses de rodovia. A Tabela 19 apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões utilizados no experimento 3 do Grupo 2.

TABELA 19 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 3, GRUPO 2.

Atitude (rad)			Posição (m)		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
5,4938	0,07678	0,062437	677347,	7184141,	1652,
Precisões					
0,060454	0,063056	0,062454	25,	30,	-10,

Os parâmetros de orientação exterior deste experimento, foram estimados a partir do método IEKF e são apresentados na Tabela 20.

TABELA 20 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 3, GRUPO 2.

Método proposto		Desvio-padrão	Parâmetros de orientação exterior verdadeiros		Erros verdadeiros
$\kappa$	5,441233	000006699	$\kappa$	5,441528	0,00029
$\varphi$	0,0289327	0,00013056	$\varphi$	0,024431	0,0045
$\omega$	-0,00358636	0,0001601	$\omega$	0,002437	0,0011
$X_0$ (m)	677324,43	0,099002	$X_0$ (m)	677322,24	2,19
$Y_0$ (m)	7184116,29	0,1218	$Y_0$ (m)	7184111,45	4,84
$Z_0$ (m)	1657,50	1,463	$Z_0$ (m)	1662,98	5,48

A Tabela 21 apresenta um resumo dos resultados obtidos no processo de correlação e detecção de erros grosseiros.

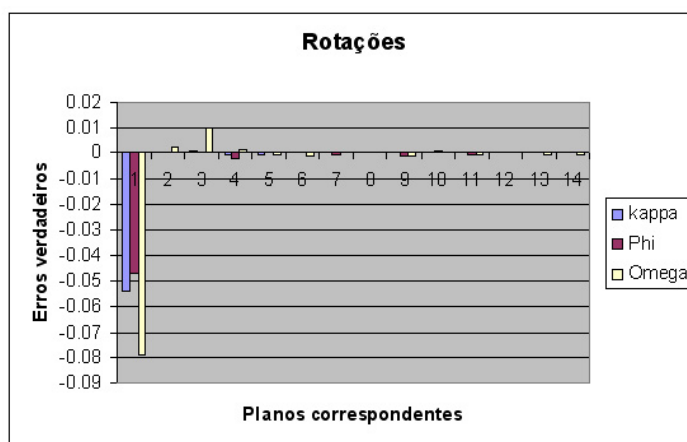
TABELA 21 – RESUMO DOS RESULTADOS DO PROCESSO DE CORRELAÇÃO  
– EXPERIMENTO 3, GRUPO 2.

Correlação	V ou F	Grau de correlação (%)	$S_{a/a^*}$	$S_{b/b^*}$	Número de iterações
$P_i^0 / P_r^0$	V	86,	-0,851822	-0,780640	5
$P_i^2 / P_r^2$	V	100,	1,240676	-0,249390	3
$P_i^4 / P_r^4$	V	100,	0,002205	0,479432	3
$P_i^6 / P_r^6$	V	100,	-0,080433	-0,604849	3
$P_i^8 / P_r^8$	V	100,	-0,202965	-1,423819	3
$P_i^{10} / P_r^{10}$	V	100,	-0,329457	-1,329406	3
$P_i^{12} / P_r^{12}$	V	100,	-0,467900	0,874732	3
$P_i^{14} / P_r^{14}$	V	100,	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx
$P_i^1 / P_r^3$	F	86,	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx
$P_i^2 / P_r^4 ; P_i^3 / P_r^6 ;$ $P_i^6 / P_r^8 ; P_i^7 / P_r^8$	F	93,	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx

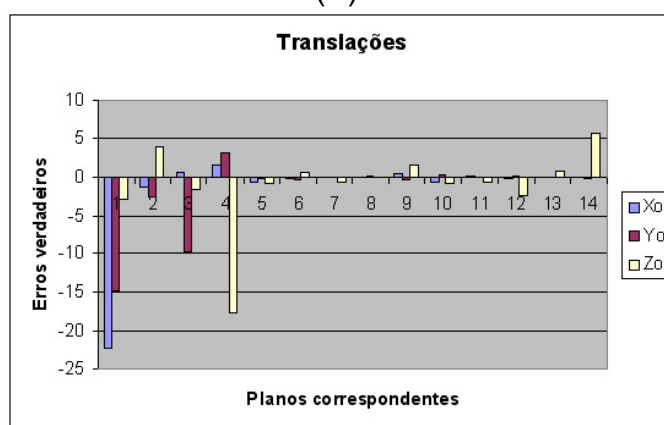
O Gráfico 5 apresenta a visualização da estabilização dos parâmetros em função do número de planos correspondentes e os erros verdadeiros determinados para o experimento 3, do grupo 2.



## GRÁFICO 5 – ESTABILIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR – EXPERIMENTO 3, GRUPO 2.



(A)



(B)

Com a análise da Tabela 20 e do Gráfico 5 pode-se concluir que, as rotações apresentaram um padrão de convergência após a 5ª correlação. Os parâmetros obtidos não se apresentaram confiáveis, quando comparados com os parâmetros verdadeiros. O fato pode ser devido à distribuição não homogênea dos planos de apoio de campo.

Os parâmetros  $X_0$  e  $Y_0$  apresentaram um padrão de convergência após a 5ª correlação, com ligeiras perturbações entre a 8ª e a 11ª correlação. O parâmetro  $Z_0$  não apresentou um padrão de convergência, e pode ser devido à posição desfavorável que se encontra o CP da câmara em relação à distribuição dos planos de apoio.

Uma análise da Tabela 21 permite dizer que, todos os planos homólogos obtiveram correlações, porém, falsas correlações foram estabelecidas. O

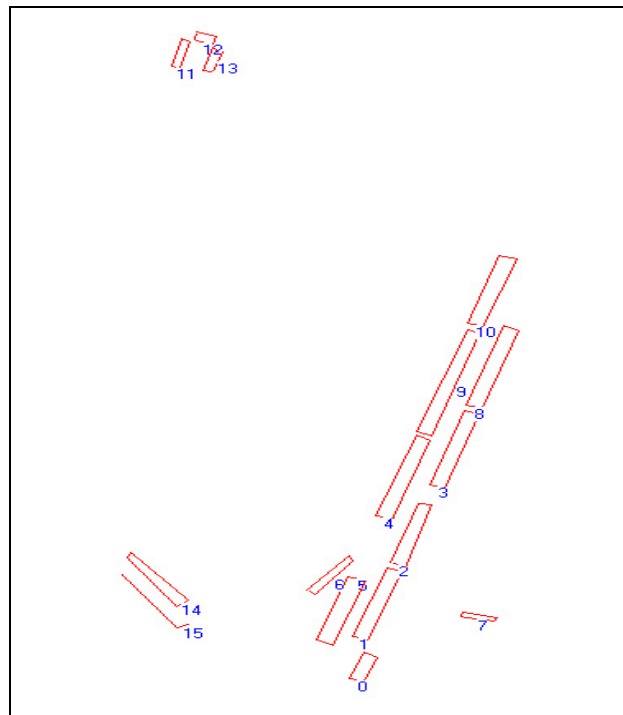
posicionamento desfavorável do primeiro plano influenciou na obtenção de um baixo grau de correlação verdadeira (86%).

Após a primeira correlação estabelecida, os graus de correspondência obtidos foram de 100%. Porém, como o processo é mal-condicionado, em outros casos podem ser encontradas soluções reversas e as observações intrínsecas ao plano 14 (corretamente estabelecido), foram detectadas pela técnica estatística *data-snooping*. Fato que pode ser explicado devido a inserção de erro grosseiro nas observações intrínsecas ao plano correspondente. Ou seja, foram inseridos erros grosseiros na observação para avaliar a eficiência da técnica de detecção de erros em identificar erros grosseiros em correlações verdadeiras.

O uso da janela de restrição não foi capaz de evitar o estabelecimento de falsas correlações, tais como,  $P_i^2 / P_r^4 ; P_i^3 / P_r^6 ; P_i^6 / P_r^8 ; P_i^7 / P_r^8$ , Desta forma, acredita-se que o problema se resume em definir novos atributos para parametrizar os problemas encontrados.

Para avaliar o comportamento do método com o uso hipóteses de grande porte foram simuladas figuras planas em dois eixos da rodovia e com distribuição das hipóteses de forma que cruzem a imagem digital no sentido diagonal ao plano da imagem, além do uso de alguns planos distribuídos em torno da imagem. A Figura 34 apresenta a distribuição das figuras planas simuladas na imagem digital.

FIGURA 34 – DISTRIBUIÇÃO DOS PLANOS SIMULADOS NA IMAGEM DIGITAL – EXPERIMENTO 4, GRUPO 2.



A Tabela 22 apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões utilizados neste experimento.

TABELA 22 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 4, GRUPO 2.

Atitude (rad)			Posição (m)		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
5,4839	0,06684	0,059790	677720,	7184400,	1664,
Precisões					
0,060383	0,061839	0,061833	25,	25,	5,

Neste experimento, foram coletados 16 figuras planas e a Tabela 23 apresenta um resumo dos resultados obtidos no processo de correlação e detecção de erros grosseiros.

TABELA 23 – RESUMO DOS RESULTADOS DO PROCESSO DE CORRELAÇÃO, DETECÇÃO DE ERROS GROSSEIROS E IDENTIFICAÇÃO DE FALSAS-CORRELAÇÕES – EXPERIMENTO 4, GRUPO 2,

Correlação	V ou F	Grau de correlação (%)	$S_{a/a^*}$	$S_{b/b^*}$	Número de iterações
$P_i^0 / P_r^0$	V	93,	-1,002142	-0,828080	4
$P_i^2 / P_r^2$	V	100,	-0,062805	-0,509996	3
$P_i^4 / P_r^4$	V	100,	-0,172243	1,018232	2
$P_i^6 / P_r^6$	V	100,	-0,339404	0,015688	2
$P_i^8 / P_r^8$	V	100,	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxxxxxx
$P_i^{10} / P_r^{10}$	V	100,	0,545888	0,432307	3
$P_i^{12} / P_r^{12}$	V	100,	-1,313461	-0,008474	2
$P_i^{14} / P_r^{14}$	V	100,	0,522718	-0,406333	2

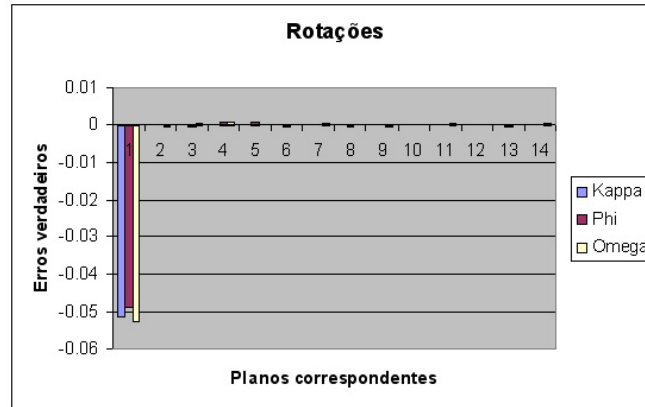
Os parâmetros de orientação exterior foram ajustados com uso do método IEKF e são apresentados na Tabela 24.

TABELA 24 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 4, GRUPO 2.

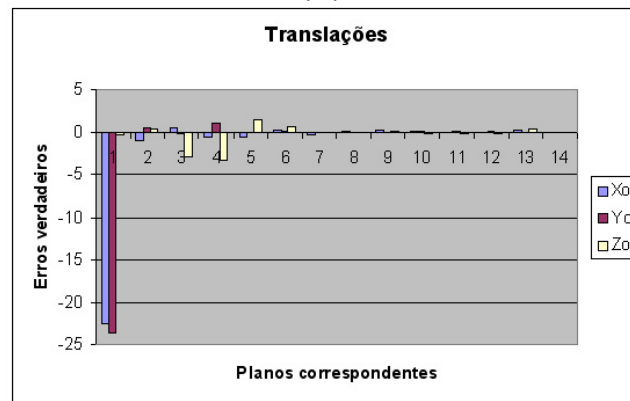
Método proposto		Desvio-padrão		Parâmetros de orientação exterior verdadeiros		Erros verdadeiros
$\kappa$	5,432205	0,000055117		$\kappa$	5,431611	0,000594
$\varphi$	0,01596859	0,00016959		$\varphi$	0,014488	0,001480
$\omega$	0,007878760	0,00018947		$\omega$	0,009790	0,001911
$X_0$ (m)	677696,04	0,13462		$X_0$ (m)	677695,08	0,96
$Y_0$ (m)	7184377,70	0,17112		$Y_0$ (m)	7184375,74	1,96
$Z_0$ (m)	1659,49	0,63215		$Z_0$ (m)	1659,84	0,35

O Gráfico 6 apresenta o padrão de convergência dos parâmetros em função do número de figuras planas correspondentes e o erro verdadeiro.

GRÁFICO 6 – PADRÃO DE CONVERGÊNCIA DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR – EXPERIMENTO 4, GRUPO 2.



(A)



(B)

De acordo com a Tabela 23 pode-se dizer que, todas as correlações foram estabelecidas. O ganho da métrica (grau de correlação) foi de 100% após a 1ª correlação estabelecida. O número de iteração decresce monotonicamente de acordo com o estabelecimento das correlações e foram detectados erros grosseiros nas observações relativas aos planos  $P_i^8 / P_r^8$ . Este problema não foi claramente entendido, pois não foram inseridos erros grosseiros nas observações.

Analisando a Tabela 24 e o Gráfico 6, pode-se concluir que, as rotações apresentaram um padrão de convergência a partir da 1ª correlação, mostrando que o tamanho das feições retas utilizadas no processo tem grande influência no comportamento dos parâmetros de rotação.

Os parâmetros  $X_0$  e  $Y_0$  apresentaram um padrão de convergência após a 3ª correlação, com ligeira perturbação do parâmetro  $Y_0$  na 4ª correlação, porém não

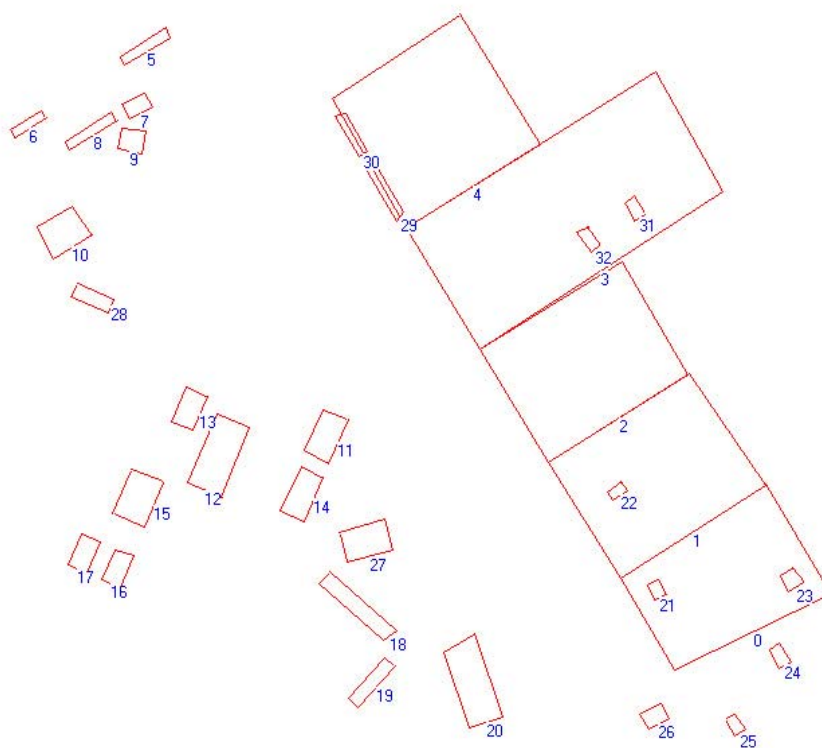
afetou as demais correlações. Esses fatos podem ser originados pela posição dos planos **0** até **6** que estão concentrados numa pequena região da imagem, não permitindo que a geometria da câmara tenha uma relação favorável com a distribuição das observações.

No caso dos parâmetros de translação o uso de feições retas de grande porte pode apresentar um efeito negativo, principalmente em relação ao parâmetro  $Z_0$ , pois devido ao deslocamento do relevo, a projeção da feição reta do espaço-objeto para o espaço-imagem pode sofrer grandes variações de inclinação vertical, Esta variação pode ser uma somadora da instabilidade no padrão de convergência do parâmetro  $Z_0$  que se apresenta em todos os experimentos descritos anteriormente.

#### 4.1.3 Análise dos experimentos do grupo 3

Este experimento agrupa todos os tipos de feições cartográficas utilizadas nos experimentos anteriores, ou seja, são utilizadas figuras planas como apoio de campo derivados de edificações, quadras e hipóteses de rodovias. O objetivo deste experimento é analisar o comportamento do método com uso de vários tipos de agrupamentos simulados na imagem digital. A Figura 35 apresenta as figuras planas simuladas e distribuídas por toda a imagem digital.

FIGURA 35 – DISTRIBUIÇÃO DAS FIGURAS PLANAS SIMULADAS NA IMAGEM DIGITAL – EXPERIMENTO 1 DO GRUPO 3.



As figuras planas de grande porte definem quadras com 150 metros de comprimento. As figuras planas de médio porte representam hipóteses de rodovias e as figuras planas de pequeno porte representam as edificações. A Tabela 25 apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões utilizados neste experimento.

TABELA 25 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – GRUPO 3.

Atitude (rad)			Posição (m)		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
2,0047	0,0678	-0,06674	677203,	7183456,	1680,
Precisões					
0,06	0,06	-0,06	30,	-30,	30,

Para a realização deste experimento, foram coletadas 33 figuras planas de apoio de campo, e o método IEKF foi empregado na estimação dos parâmetros de orientação exterior da câmara. A técnica *data-snooping* foi utilizada na detecção de erros grosseiros. Um resumo dos resultados obtidos no processo de correlação e detecção de erros grosseiros é apresentado na Tabela 26.

TABELA 26 – RESUMO DOS RESULTADOS DO PROCESSO DE CORRELAÇÃO – EXPERIMENTO 1, GRUPO 3.

Correlação	V ou F	Grau de correlação (%)	iterações
$P_i^0 / P_r^0$	V	99,	4
$P_i^2 / P_r^2$	V	84,	3
$P_i^{10} / P_r^{10}$	V	100,	3
$P_i^{20} / P_r^{20}$	V	100,	2
$P_i^{22} / P_r^{22}$	V	100,	4
$P_i^{24} / P_r^{24}$	V	100,	2
$P_i^{26} / P_r^{26}$	V	98,	2
$P_i^{28} / P_r^{28}$	V	98,	2
$P_i^{30} / P_r^{30}$	V	97,	3
$P_i^{32} / P_r^{32}$	V	97,	2

A Tabela 27 apresenta os parâmetros de orientação exterior ajustados pelo IEKF e os parâmetros de orientação exterior verdadeiros da imagem simulada.

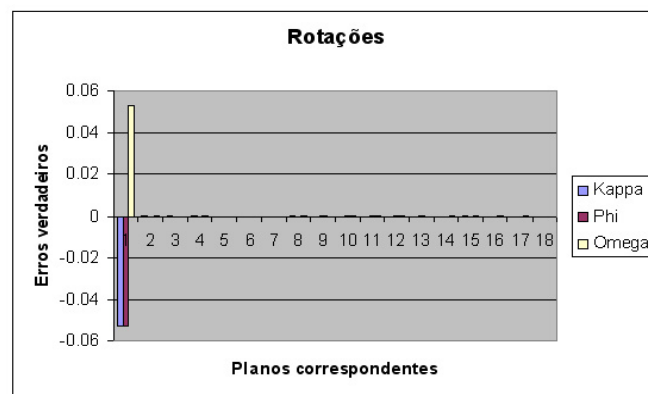


TABELA 27 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – EXPERIMENTO 1, GRUPO 3.

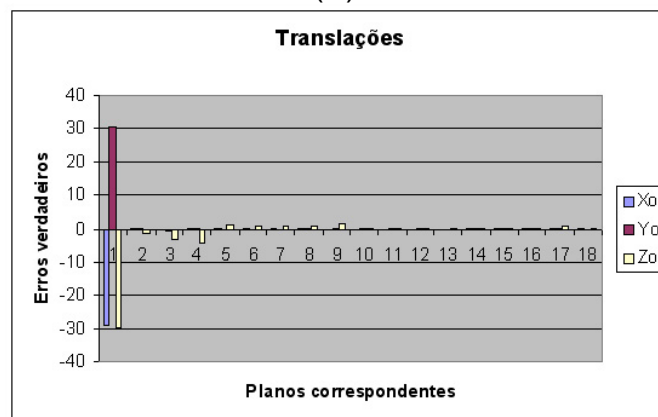
Método proposto		Desvio-padrão	Parâmetros de orientação exterior verdadeiros		Erros verdadeiros
$\kappa$	1,952456	0,000022256	$\kappa$	1,952429	0,000027
$\varphi$	0,01470914	0,000065558	$\varphi$	0,015495	0,00078
$\omega$	-0,01453657	0,000093859	$\omega$	-0,014390	0,00014
$X_0$ (m)	677174,60	0,050823	$X_0$ (m)	677173,32	1,28
$Y_0$ (m)	7183486,15	0,069668	$Y_0$ (m)	7183486,38	0,23
$Z_0$ (m)	1650,06	0,4358	$Z_0$ (m)	1650,60	0,54

O Gráfico 7 apresenta a visualização da estabilização dos parâmetros em função do número de figuras planas correspondentes e o erro verdadeiro para o experimento descrito.

GRÁFICO 7 – ESTABILIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR – EXPERIMENTO 1, GRUPO 3.



(A)



(B)

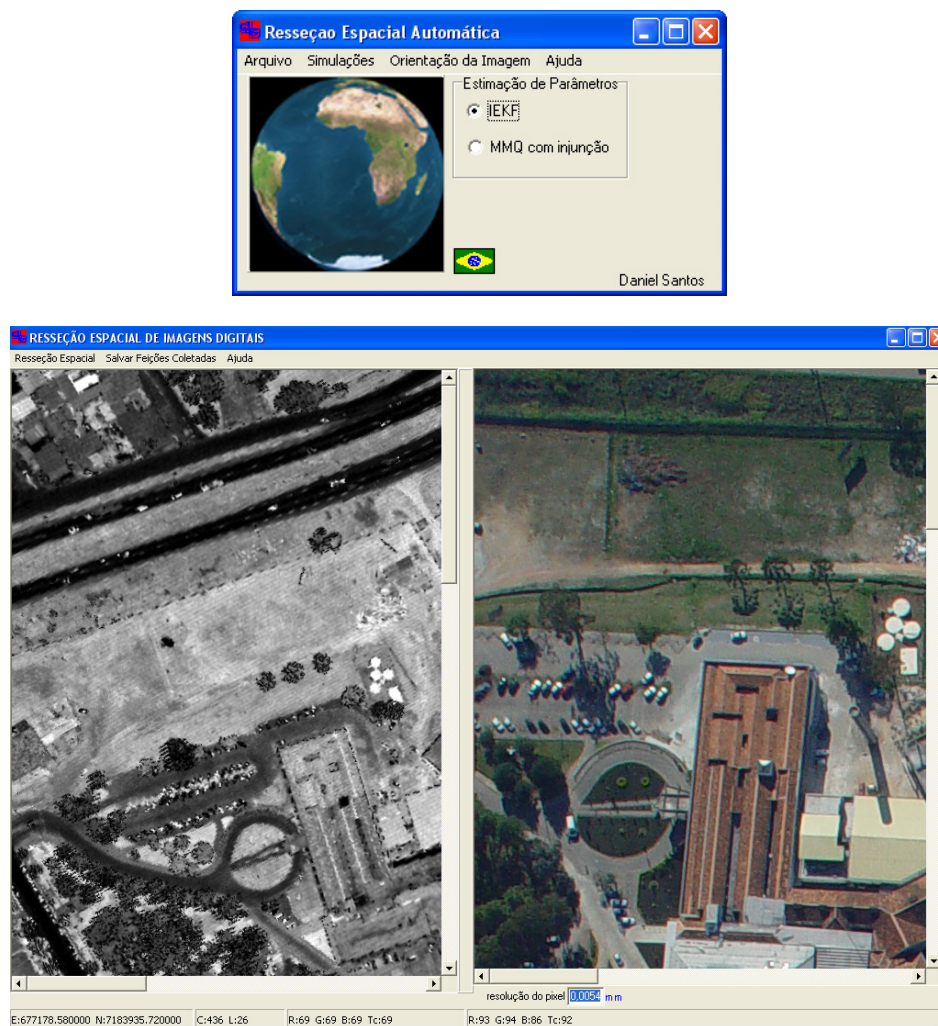
A análise do Gráfico 7, permite dizer que, as rotações e os parâmetros  $X_0$  e  $Y_0$  apresentaram um padrão de convergência bastante rápido. Porém, o parâmetro  $Z_0$  ainda não apresentou um padrão de convergência com a mesma velocidade dos parâmetros anteriores. No entanto, sua variação ao longo do estabelecimento das correlações não perturbou a convergência dos demais parâmetros.

Neste experimento, verificou-se com melhor entendimento, a influência do tamanho das feições retas no processo de convergência dos parâmetros, pois o uso de figuras planas de grande porte no início do processo ajudou consideravelmente na estabilização completa dos parâmetros de rotação e dos parâmetros  $X_0$  e  $Y_0$ , já a partir da 1ª correlação. Porém, deve-se investigar melhor o comportamento do parâmetro  $Z_0$ . Entretanto, a explicação mais factível pode ser dada em função da projeção das feições retas prejudicada pelo deslocamento do relevo. Em todos os experimentos realizados o parâmetro  $Z_0$  apresentou um desvio-padrão maior.

## 4.2 ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS

A ferramenta de resseção espacial automática de imagens foi desenvolvida em linguagem de programação C++ Builder 5.0 da Borland. A Figura 36, apresenta uma janela da ferramenta desenvolvida.

FIGURA 36 – FERRAMENTA DE AUTOMAÇÃO DA RESSEÇÃO ESPACIAL DE IMAGENS.



A ferramenta desenvolvida pode ser usada em dois modos diferentes, isto é, o modo automático e o modo semi-automático. Neste trabalho o enfoque será dado ao modo automático.

No modo automático as hipóteses de rodovia são geradas na imagem de intensidade e na imagem digital por meio de combinação de várias técnicas de PDI. As etapas de geração de hipóteses de rodovia são divididas em:

- Classificação de objetos baseada em imagens coloridas;
- Classificação de objetos rodovia baseada em descritores de variação espacial;
- Classificação de objetos rodovia na proporção de contraste;
- Extração de objetos rodovias:
  - Fluxo para extração de objetos rodovia; e
  - Geração de hipóteses de rodovia em potencial.

Com o objetivo de testar a metodologia desenvolvida, foram conduzidos alguns experimentos reais. Foram utilizadas imagens digitais coloridas, cedidas pela empresa AGRITEC/S.A, capturadas por uma câmara digital Sony DSC-727 717, com uma resolução do pixel de 5,4  $\mu\text{m}$ . Os parâmetros de orientação interior da câmara foram calibrados por DELARA et al. (2004), e são apresentados na Tabela 28.

TABELA 28 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR.

focal (mm)	xpp (mm)	ypp (mm)	K1	K2	K3	P1	P2	A	B
10,0	-0,246	0,142	2,25e-3	,49e-5	1,29e-7	-1,17e-4	6,9e-5	-1,50e-4	9,54e-6

onde,

focal: distância focal calibrada;

xpp, ypp: coordenadas do ponto principal;

K1, K2, K3: coeficientes de distorção radial;

P1, P2: coeficientes de distorção descentrada; e

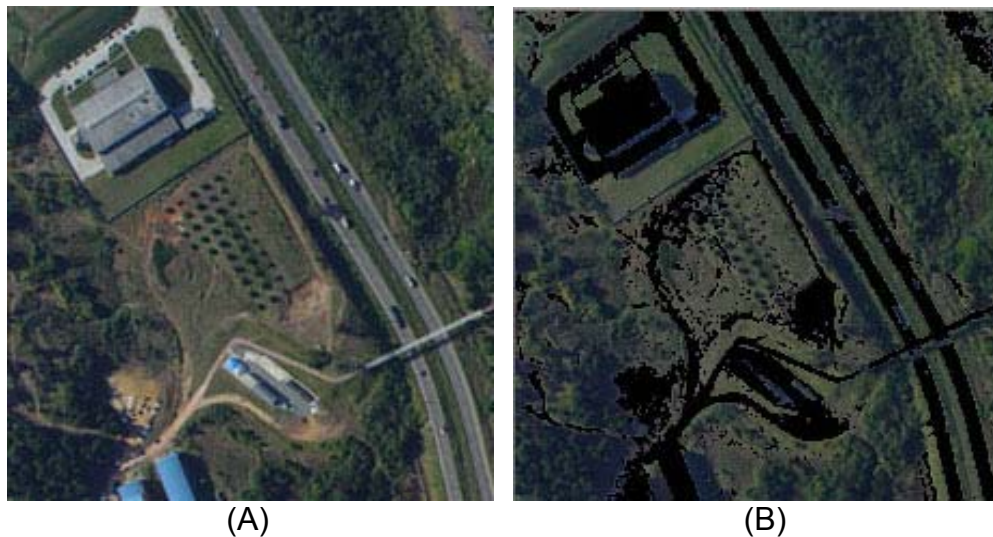
A, B: parâmetros de afinidade.

Uma vez calibrada a câmara digital, seus parâmetros de orientação interna serão utilizados para refinar as fotocoordenadas que definem as feições retas extraídas automaticamente no espaço-imagem.

#### 4.2.1 Experimento 01 – dados reais

A classificação dos objetos foi realizada para separar as edificações e rodovias (classe artificial), dos objetos vegetação e sombras (classe natural). A imagem digital utilizada para este experimento é a de número 4216 e a Figura 37 apresenta o resultado obtido com a classificação baseada em imagens coloridas.

FIGURA 37 – (A) IMAGEM ORIGINAL SELECIONADA; (B) IMAGEM CLASSIFICADA.



Como pode ser observado na Figura 37a, existem 6 tipos de objetos presentes na imagem, ou seja, edificações, rodovia, carros, sombras, vegetação e rua sem asfalto. A Figura 37b, apresenta o resultado da classificação automática da imagem baseada na Equação 23.

A imagem foi originalmente processada para separar duas classes, isto é, classe artificial (contendo os objetos antrópicos, por exemplo, carros, edificações e ruas) e classe natural (contendo árvores e sombras). Nota-se todavia que, os objetos da classe artificial foram pintados de preto e os objetos da classe natural permaneceram com suas cores originais (Figura 37b).

Como as rodovias são os objetos de interesse neste trabalho, foi aplicado o algoritmo de crescimento de regiões automático para eliminar da classe artificial os objetos identificados como edificações e carros. O processo de identificação dos

objetos é realizado através da análise dos descritores de variação espacial descrito na sub-seção 3.4.2.

Para cada região segmentada foram calculados o perímetro, a área e o coeficiente de compacidade dos objetos e eliminados do processo as regiões que não possuem forma de rodovia. A Figura 38 apresenta o resultado obtido depois de aplicada a metodologia descrita.

FIGURA 38 – IMAGEM AÉREA CLASSIFICADA POR DESCRITORES DE VARIAÇÃO ESPACIAL.



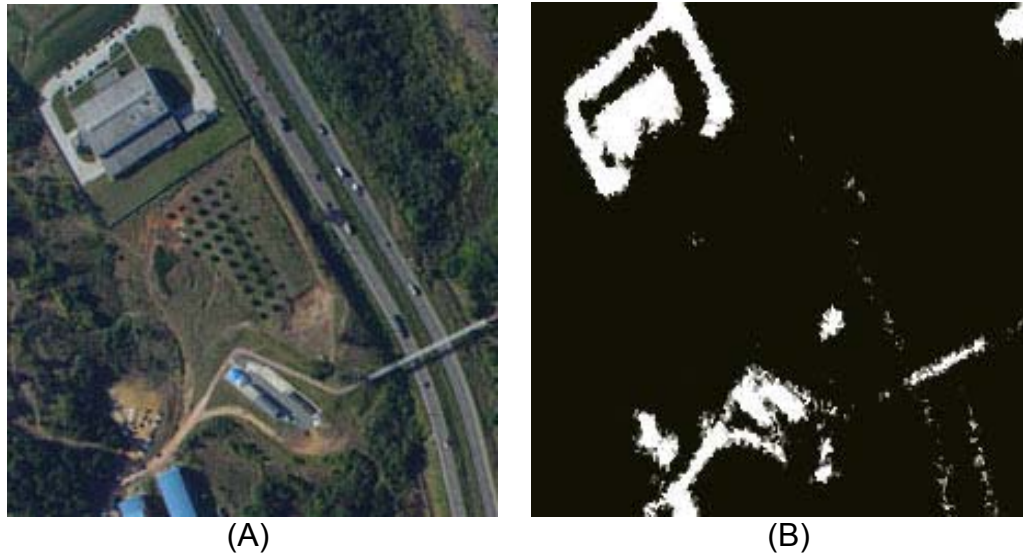
Nesta figura, as edificações e os veículos foram eliminados da classe artificial. Isto permite concluir que o uso de descritores básicos de variação espacial de um objeto pode ser aplicado com eficiência na classificação baseada em imagens coloridas. Porém, verifica-se ainda a presença de alguns objetos (pertencentes à classe artificial), como é o caso da edificação no canto inferior esquerdo (pintada de preto). Isto prova que é necessário o uso de outros parametrizadores no processo de eliminação dos objetos artificiais.

Desta forma, aplica-se o histograma de contraste dos objetos em relação a suas adjacências, ou seja, elimina-se do processamento objetos de maior contraste em relação à sua adjacência. Para tal, foi utilizado um filtro de informação de proporção de contraste da imagem caracterizado por um histograma de contraste. Este filtro possibilita reconstruir a imagem através da aplicação de cores no plano de



fundo (preto, por exemplo) e no primeiro plano (branco), como pode ser visualizado na Figura 39.

FIGURA 39 – (A) IMAGEM ORIGINAL; (B) IMAGEM DE PROPORÇÃO DE CONTRASTE.



Na Figura 39b, os objetos de alto contraste em relação as suas adjacências são apresentados em cor branca. Das Figuras 38 e 39b obteve-se o resultado final da classificação como mostrado na Figura 40.

FIGURA 40 – RESULTADO DA COMBINAÇÃO DAS CLASSIFICAÇÕES.



Através de uma análise visual pode-se verificar que, os objetos edificações e veículos foram totalmente eliminados do processo, restando apenas a informação de rodovias (pintado de preto). A partir deste resultado, iniciou-se o processo de extração de objetos semânticos e geração de hipótese de rodovias.

Para a extração de objetos semânticos, a seqüência de etapas utilizada é a apresentada na sub-seção 3.4.5.1. A Figura 41 apresenta os segmentos de retas extraídas automaticamente na imagem digital e que pertencem ao objeto rodovia.

FIGURA 41 – SEGMENTOS DE RETAS EXTRAÍDAS SOBRE O OBJETO LINEAR RODOVIA.



Observa-se na Figura 41, apenas as feições retas extraídas sobre o objeto rodovia. O resultado apresentado mostra que o método proposto reduz a quantidade de feições retas que deverão ser analisadas no processo de correspondência.

Finalmente, foram construídas as hipóteses em potencial do objeto rodovia, onde, a partir das regras apresentadas na sub-seção 3.4.6, foi aplicado o algoritmo de construção de hipóteses de rodovia, baseado em atributos radiométricos da imagem e geométricos dos segmentos extraídos. A Figura 42 apresenta as hipóteses construídas pelo algoritmo.



FIGURA 42 – HIPÓTESES GERADAS AUTOMATICAMENTE.



Verifica-se que as hipóteses geradas são construídas ao longo do objeto rodovia. Porém, existem falsas hipóteses decorrentes da conexão entre segmentos de retas paralelos, que compõem rodovias opostas. Desta forma as hipóteses geradas foram verificadas e avaliadas, com a finalidade de eliminar as falsas hipóteses.

A etapa de verificação das hipóteses rodovia ocorre quando se aplica a regra (4), isto é, a regra de classe. A Figura 43 apresenta as hipóteses verificadas após aplicar a regra (4).

FIGURA 43 – HIPÓTESES GERADAS E VERIFICADAS.



Visualmente as hipóteses de menor importância, que eram claramente visíveis na Figura 43, foram eliminadas do processo. Porém, no canto superior direito da Figura 43, existem hipóteses sobrepostas que podem causar erros de conexão (etapa de conexão entre hipóteses adjacentes - processamento futuro). Por isso é necessário aplicar a regra (5), para o estabelecimento e validação das hipóteses em potencial. A Figura 44, apresenta os resultados obtidos depois de aplicada a regra (5).

FIGURA 44 – HIPÓTESES EM POTENCIAL AVALIADAS.



Com uma análise da Figura 44, pode-se concluir que as hipóteses em potencial foram reconstruídas, verificadas e avaliadas com sucesso. No entanto, as irregularidades das bordas da rodovia e oclusões causadas pela presença de sombra e carros são causadores de problemas na geração de hipóteses.

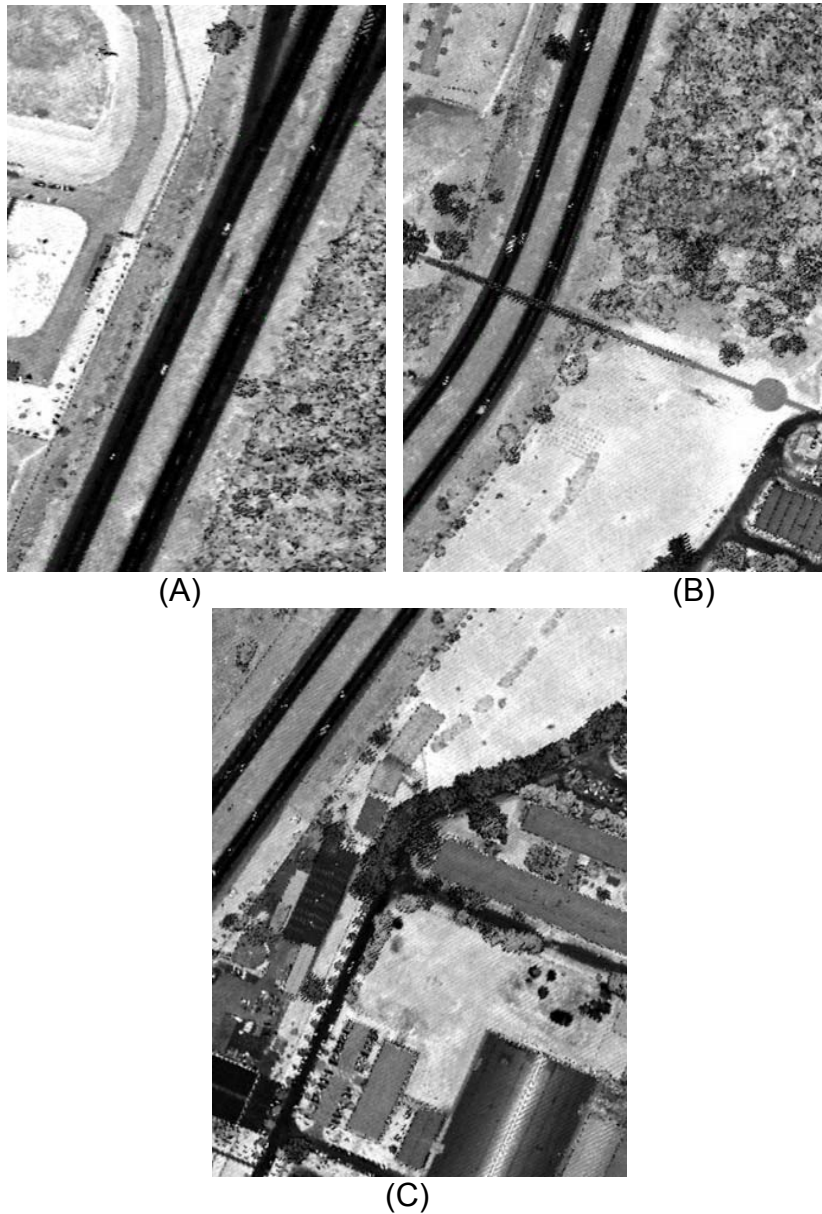
Podem ser verificadas a existência de alguns problemas de ordem geométrica dos planos, como por exemplo, hipóteses de rodovia bastante irregulares são apresentados no canto inferior direito. Este problema poderá ter efeitos negativos na solução das correspondências.

Após a extração dos hipóteses de rodovia na imagem digital, as feições retas que compõem cada hipótese de rodovia são transformadas e referenciadas para o sistema do centro da imagem e corrigidas dos erros sistemáticos. Os

parâmetros  $a$  e  $b$  da reta, e suas respectivas variâncias são então recalculados, considerando-se as correções dos erros sistemáticos.

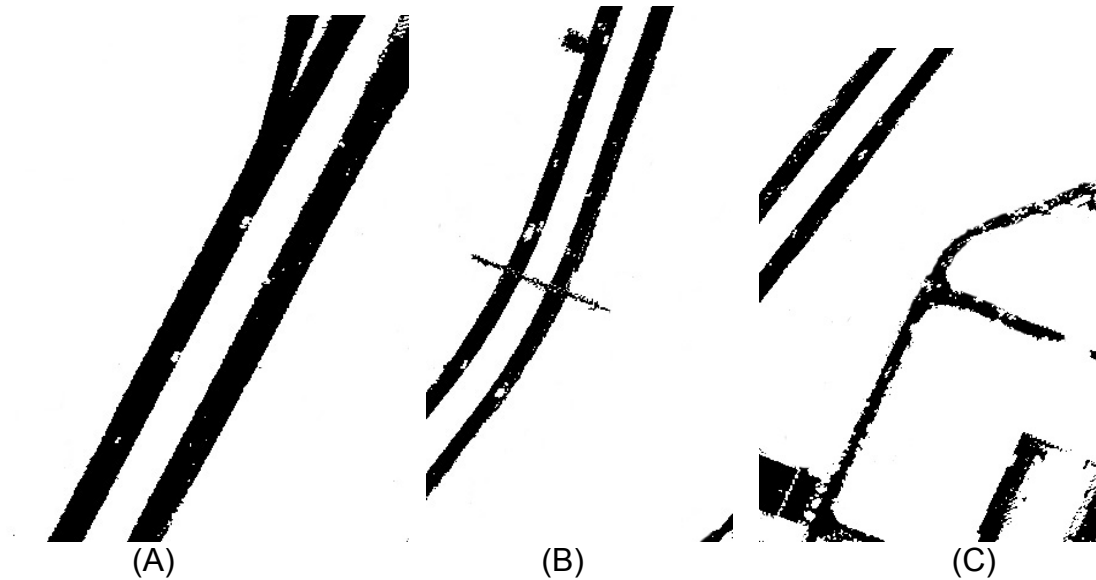
Após a construção das hipóteses de rodovia na imagem digital foi aplicada a metodologia apresentada na sub-seção 3.5, para construção de hipóteses de rodovia na imagem de intensidade. A Figura 45 apresenta recortes de regiões específicas da imagem de intensidade, correspondentes à região da imagem digital a ser orientada.

FIGURA 45 – RECORTE DE REGIÕES ESPECÍFICAS DA IMAGEM DE INTENSIDADE.



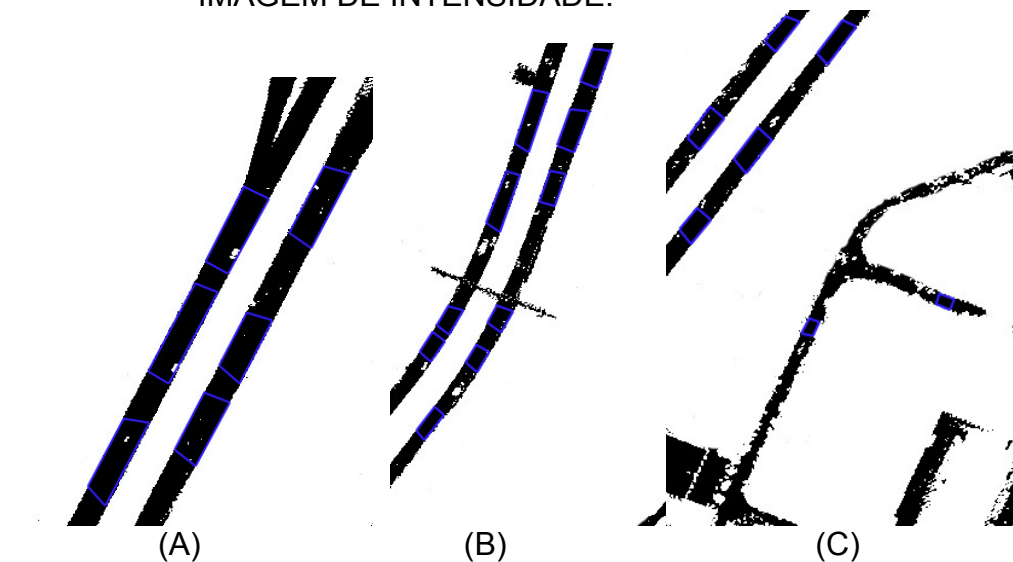
Ao se aplicar o filtro de classificação de objetos nulos proposto, observa-se os resultados apresentados na Figura 46.

FIGURA 46 – OBJETOS CLASSIFICADOS PELO FILTRO PROPOSTO.



Os objetos de interesse são apresentados em cor preta. Com a classificação dos objetos presentes na imagem de intensidade foi aplicada a mesma metodologia de extração de hipóteses de rodovia utilizada para imagens digitais. A Figura 47 apresenta estas hipóteses de rodovia geradas na imagem de intensidade.

FIGURA 47 – HIPÓTESES DE RODOVIA EXTRAÍDAS AUTOMATICAMENTE NA IMAGEM DE INTENSIDADE.



Desta figura é possível extrair as seguintes conclusões:

- As hipóteses em potencial foram geradas, verificadas e avaliadas com sucesso no espaço-objeto;
- Neste processo, não é necessário aplicar a classificação de objetos baseada em contraste, pois na imagem de intensidade, as rodovias e as ruas possuem um valor de intensidade (preto) bastante diferenciado dos demais objetos; e
- A qualidade geométrica da imagem de intensidade é bastante inferior à qualidade geométrica da imagem digital. Este fato poderá causar variações na definição geométrica da feição reta.

A Tabela 29 abaixo apresenta um resumo dos parâmetros das feições retas extraídas automaticamente da imagem digital utilizada neste experimento (4216), sua parametrização (H-Horizontal ou V-Vertical) e suas respectivas variâncias ( $\sigma_a^2 / \sigma_{a*}^2$   $\sigma_b^2 / \sigma_{b*}^2$ ), bem como as coordenadas ENH de um dos pontos extremos das feições retas extraídas automaticamente na imagem de intensidade, bem como seus respectivos cossenos diretores.

TABELA 29 – PARÂMETROS DAS FEIÇÕES RETAS, SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES, PONTOS EXTREMOS DAS FEIÇÕES RETAS EXTRAÍDOS NO ESPAÇO-OBJETO E OS COSSENOS DIRETORES.

reta	H/ V	a/a*	b/b*	$\sigma_a^2 / \sigma_{a*}^2$	$\sigma_b^2 / \sigma_{b*}^2$	E (m) 670000	N (m) 7180000	H (m)			
			(mm)		(mm)				l	m	n
<b>Plano</b>											
0	V	3,62	-16,51	1,375e-01	2,048e-02	8000,51	4296,98	920,86	0,994	0,101	0,029
1	H	-5,75	7,68	2,232e-00	5,408e-02	8006,85	4297,63	921,05	0,200	-0,979	-0,010
2	V	6,30	-27,80	4,615e-02	4,366e-01	8009,72	4283,59	920,90	-0,977	-0,205	-0,044
3	H	-8,11	9,63	1,499e-01	2,982e-02	8004,24	4282,44	920,65	-0,248	0,968	0,013

Pode-se perceber na Tabela 29 que as variâncias dos parâmetros  $a$  e  $b$  das feições retas são relativamente grandes, ou seja, pode-se dizer que as feições retas foram extraídas com baixa qualidade. Por isso espera-se que os parâmetros de orientação exterior não sejam determinados com confiança desejada. A Tabela 30

apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões adotadas para este experimento.

TABELA 30 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES.

Atitude			Posição (m)		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
$314^0 54'23''$	$4^0 11'60''$	$3^0 49'27''$	7519,	4262,	1670,
Precisões					
$3^0 46'18''$	$3^0 55'37''$	$3^0 55'40''$	30,	30,	10,

A Tabela 31 apresenta os parâmetros de orientação exterior da câmara ajustados pelo método proposto e os resultados obtidos por DELARA et al. (2004).

TABELA 31 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – IMAGEM 4216.

Método proposto		Desvio-padrão		DELARA et al. (2004)		Desvio-padrão
$\kappa$	$315^0 41'31''$	$1^0 32'12''$		$\kappa$	$311^0 55'11''$	$0^0 02'41''$
$\varphi$	$0^0 52'41''$	$0^0 27'21''$		$\varphi$	$1^0 02'11''$	$0^0 12'00''$
$\omega$	$1^0 57'50''$	$0^0 37'46''$		$\omega$	$0^0 53'45''$	$0^0 12'05''$
$X_0$ (m)	677524,336	1,766		$X_0$ (m)	677489,861	1,601
$Y_0$ (m)	7184242,900	2,037		$Y_0$ (m)	7184232,337	1,611
$Z_0$ (m)	1690,042	7,196		$Z_0$ (m)	1660,410	0,433

Não é possível verificar o erro verdadeiro cometido, pois os valores reais do centro perspectivo da câmara não são conhecidos. No entanto, os resultados obtidos com o método proposto serão confrontados com os resultados obtidos por DELARA et al. (2004). É importante ressaltar que DELARA et al. (2004), utilizou um processo de aerotriangulação por feixes de raios simultâneos (melhor rigidez geométrica), com pontos de apoio derivados da imagem de intensidade para determinar os parâmetros de orientação exterior da câmara. No entanto, os

resultados obtidos também estão eivados de erros provenientes do processo realizado.

Desta forma, foram calculadas as diferenças entre os resultados obtidos por ambos os métodos. Contudo, não se deve confundir essas discrepâncias com o erro verdadeiro do posicionamento e rotação do CP da câmara, pois os desvios-padrão apresentados procuram indicar a precisão dos parâmetros para aquela determinada posição, e não as diferenças.

Outro fator importante é que, a comparação entre os resultados não é totalmente apropriada pelo fato de que a rigidez geométrica de uma aerotriangulação é muito melhor que na resseção espacial de imagens, além do que os resultados obtidos por DELARA et al. (2004), são frutos de um processo totalmente manual, uma vez que o método proposto é totalmente automático.

Sendo assim, de acordo com a Tabela 31 observa-se que, os parâmetros de orientação exterior foram recuperados pela metodologia proposta e a discrepância dos desvios entre os dois métodos é da ordem de  $1^{\circ} 30'$  para as rotações e em torno de 7 m para as translações.

Verifica-se que ocorreu uma divergência no parâmetro de rotação  $\kappa$ . O fato provocou uma variação no parâmetro  $Y_0$  apresentando um desvio maior em relação ao parâmetro  $X_0$ . A divergência do parâmetro de rotação  $\kappa$  pode ser explicada devido à grande rotação em  $\kappa$  (da ordem de  $300^{\circ}$ ), existente entre a imagem digital e o terreno, uma vez que os demais parâmetros de rotação não sofreram divergências, além de apresentarem desvios menos significativos, da ordem de  $37'$ .

Os desvios encontrados também podem ser explicados devido à baixa qualidade das feições retas extraídas, provocada principalmente pela falta de sofisticação do algoritmo de extração de feições retas utilizado neste trabalho. Os fatores de descontinuidade do objeto na imagem devido à presença de sombras projetadas na rodovia, acostamentos não asfaltados e o efeito de *aliasing*, impossibilitam uma extração das feições retas de boa qualidade.

Feições retas extraídas com baixa qualidade apresentam uma  $\Sigma^{lb}$  bastante elevada e fazem com que a mesma seja insignificante no cálculo do ganho de Kalman, aumentando o nível de complexidade do processo, pois a probabilidade de divergência do filtro é muito maior. Sendo assim, as possíveis verdadeiras



correspondências são descartadas do processo enfraquecendo a rigidez geométrica e apresentando resultados de menor confiança.

Da análise deste experimento, conclui-se que a metodologia implementada recupera os parâmetros de orientação exterior da câmara. Porém, os resultados apresentam-se menos precisos em relação ao método realizado por DELARA et al. (2004). Entretanto, não é possível determinar a acuracidade do método, devido à falta de valores reais do centro perspectivo da imagem 4216 para uma análise concreta.

Uma das vantagens do método é sua autonomia, uma vez que o apoio de campo, o estabelecimento das correspondências, a estimação dos parâmetros e o controle de qualidade são realizados automaticamente, fornecendo uma característica inédita ao trabalho.

O método proposto apresenta a possibilidade do uso de hipóteses de rodovia em potencial como apoio de campo que tem como alternativa uma melhora na rigidez geométrica do agrupamento. No entanto, a eficiência do ponto descrito depende da qualidade das feições retas extraídas.

Com a finalidade de entender melhor os resultados obtidos no experimento descrito e os problemas decorridos devido ao grande valor de rotação  $\kappa$  em relação à imagem digital e o terreno, foram utilizados para a estimação dos parâmetros novos valores iniciais para a convergência do filtro (parâmetros aproximados). Ou seja, o ângulo de rotação  $\kappa$  estabelecido por DELARA et al. (2004), foi utilizado como parâmetro aproximado para um segundo experimento na imagem 4216. A Tabela 32 apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados e os resultados obtidos pelo método proposto do segundo experimento para a imagem 4216.



TABELA 32 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E AJUSTADOS – IMAGEM 4216 –EXPERIMENTO 2.

PARÂMETROS APROXIMADOS					
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
$311^0 55'11''$	$4^0 11'60''$	$3^0 49'27''$	7519,	4262,	1670,
Precisões					
$0^0 02'41''$	$3^0 55'37''$	$3^0 55'40''$	30,	30,	10,
PARÂMETROS AJUSTADOS					
Método proposto		Desvio-padrão		DELARA et al. (2004)	Desvio-padrão
$\kappa$	$311^0 55'19''$	$0^0 02'40''$		$\kappa$	$0^0 02'41''$
$\varphi$	$3^0 27'12''$	$0^0 12'39''$		$\varphi$	$1^0 02'11''$
$\omega$	$0^0 11'34''$	$0^0 14'32''$		$\omega$	$0^0 53'45''$
$X_0$ (m)	677522,061	1,72		$X_0$ (m)	677489,861
$Y_0$ (m)	7184241,880	2,004		$Y_0$ (m)	7184232,337
$Z_0$ (m)	1690,529	7,173		$Z_0$ (m)	1660,410
					0,433

Pode-se verificar na Tabela 32 que foi dado um novo valor inicial apenas para o parâmetro de rotação  $\kappa$ . Uma análise desta tabela permite dizer que, os resultados obtidos com os novos valores iniciais para a convergência do filtro não influenciaram significativamente os novos resultados obtidos, quando comparados com os resultados apresentados na Tabela 31.

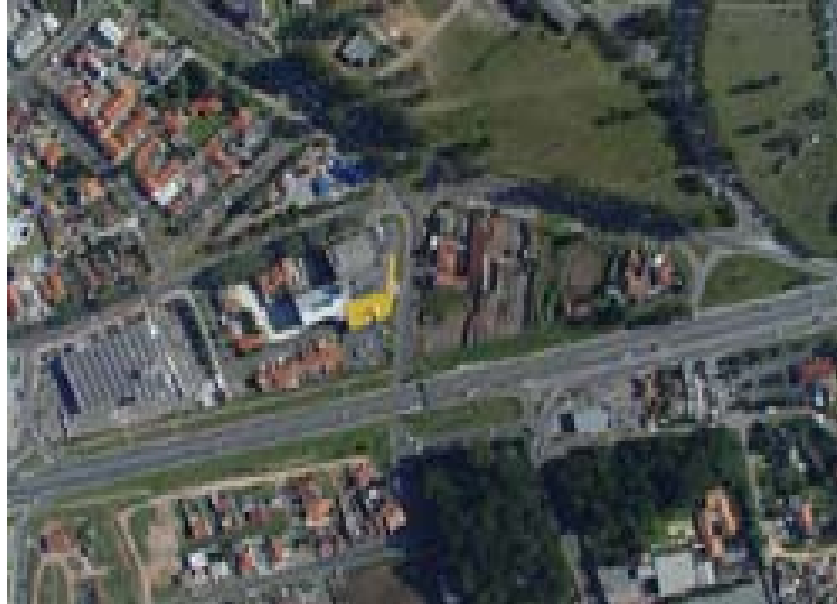
#### 4.2.2 Experimento 02 – dados reais

Um dos problemas para a metodologia de geração de hipóteses de rodovia é a presença de sombras, pois as mesmas impossibilitam a extração das feições retas que compõem as rodovias e/ou ruas, e prejudicam a eficiência da construção de suas hipóteses, refletindo na baixa qualidade de extração das feições retas, pois serão extraídas feições pequenas.

Para avaliar o potencial da metodologia desenvolvida em áreas com rodovias e/ou ruas com presença de sombras, foi realizado um experimento com a imagem número 4194. Nesta imagem a presença de sombras é quantitativa em todo

o quadrante que abrange a região superior direita da imagem. A Figura 48 mostra a imagem digital que será orientada automaticamente.

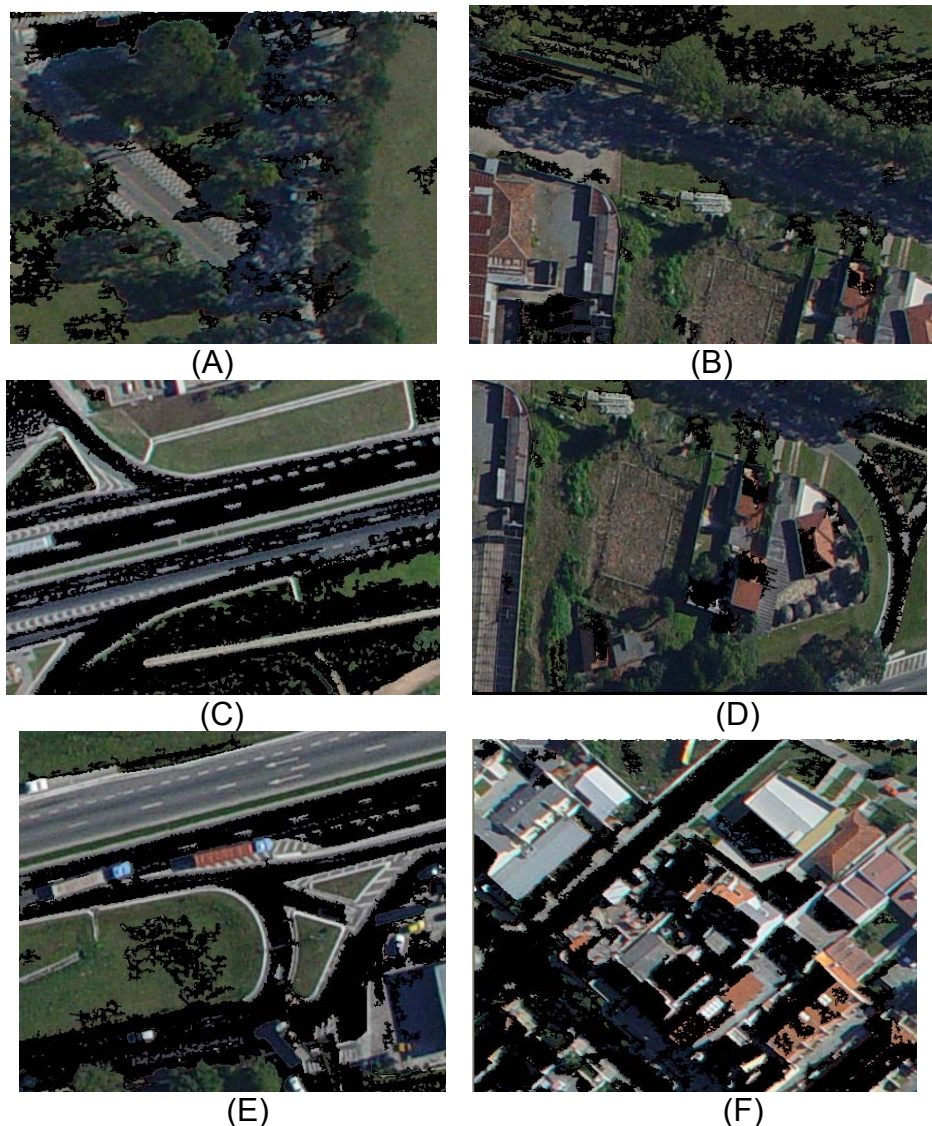
FIGURA 48 – IMAGEM DIGITAL ORIGINAL - 4194.



Como se pode observar, a presença de sombras projetadas pela vegetação, que faz adjacência com a rodovia poderá impedir a construção de hipóteses de rodovias e causará um efeito negativo no processo de estimação, pois a distribuição do apoio de campo não será homogênea.

Os mesmos procedimentos aplicados ao experimento 01 foram repetidos, as imagens que representam as regiões de Grubber foram recortadas automaticamente pelo algoritmo e foram aplicados os processos de classificação automática de objetos rodovia. A Figura 49 apresenta os resultados obtidos com o processo aplicado.

FIGURA 49 – OBJETOS SEMÂNTICOS CLASSIFICADOS EM IMAGENS DIGITAIS-4194.



Na Figura 49f verificou-se a perfeita classificação do objeto de interesse. Porém, as Figuras 49c e 49e apresentaram falhas no processo de classificação das rodovias (parte inferior e superior). A ocorrência foi causada por uma falha na eficiência do algoritmo de agregação de pixels no processo automático de crescimento de região determinando um coeficiente de compacidade que não representa o objeto classificado.

Ao se observar as Figuras 49a, 49b e 49d verificou-se que, a presença de sombras não permitiu a classificação de alguns objetos rodovia no processo de filtragem, e desta forma impossibilita uma distribuição homogênea no apoio de

campo. Entretanto, foi verificada a eficiência da metodologia na classificação de objetos rodovias, pois tanto os veículos como as edificações foram totalmente eliminadas do processo.

Com os resultados obtidos aplicou-se os algoritmos de extração, verificação e convalidação de hipóteses de rodovia, tanto na imagem digital como na imagem de intensidade. Um resumo dos parâmetros das feições retas extraídas automaticamente na imagem digital 4194, suas parametrizações e suas respectivas variâncias, bem como as coordenadas ENH de um dos pontos extremos das feições retas extraídas automaticamente na imagem de intensidade e seus respectivos cossenos diretores, são apresentados na Tabela 33.

Na Tabela 34 são apresentados os parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões adotadas para o experimento. A Tabela 35 apresenta os parâmetros de orientação exterior da câmara ajustados pelo método proposto e os resultados obtidos por DELARA (2004).

**TABELA 33 – PARÂMETROS DAS FEIÇÕES RETAS, SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES, PONTOS EXTREMOS DAS FEIÇÕES RETAS EXTRAÍDOS NO ESPAÇO-OBJETO E OS COSSENOS DIRETORES - 4194.**

reta	H/ V	a/a*	b/b*	$\sigma_a^2 / \sigma_{a*}^2$	$\sigma_b^2 / \sigma_{b*}^2$	E (m) 670000	N (m) 7180000	H (m)	L	m	n
<b>Plano</b>											
0	H	-0,42	0,04	8,658e-02	2,514e-02	7492,92	4272,60	900,28	-0,432	-0,900	-0,036
1	V	0,42	0,15	1,388e-01	7,581e-01	7481,51	4248,87	899,31	-0,901	0,432	-0,020
2	H	-0,46	-0,10	8,829e-02	3,091e-02	7473,69	4252,62	899,13	0,401	0,914	0,047
3	H	-11,85	-5,71	3,082e+00	2,429e-01	7434,21	4232,67	898,33	0,598	-0,800	-0,004

TABELA 34 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES - 4194.

Atitude			Posição (m)		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
115 <sup>0</sup> 05'45"	-4 <sup>0</sup> 36'31"	-4 <sup>0</sup> 47'31"	678184,	7183990,	1677,
Precisões					
3 <sup>0</sup> 30'00"	-3 <sup>0</sup> 30'00"	3 <sup>0</sup> 30'00"	30,	-25,	30,

TABELA 35 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – IMAGEM 4194.

Método proposto		Desvio-padrão		DELARA et al. (2004)		Desvio-padrão
$\kappa$	118 <sup>0</sup> 45'25"	0 <sup>0</sup> 42'59"		$\kappa$	112 <sup>0</sup> 15'36"	0 <sup>0</sup> 03'12"
$\varphi$	-1 <sup>0</sup> 18'03"	0 <sup>0</sup> 39'26"		$\varphi$	-1 <sup>0</sup> 36'36"	0 <sup>0</sup> 18'49"
$\omega$	-2 <sup>0</sup> 43'38"	0 <sup>0</sup> 36'24"		$\omega$	-1 <sup>0</sup> 47'33"	0 <sup>0</sup> 22'37"
$X_0$ (m)	678142,253	4,436		$X_0$ (m)	678154,017	2,367
$Y_0$ (m)	7184002,101	5,492		$Y_0$ (m)	7184015,546	1,852
$Z_0$ (m)	1673,970	19,849		$Z_0$ (m)	1647,484	0,481

Ao se analisar os valores da Tabela 35 conclui-se que, os desvios encontrados são da ordem de 42' para as rotações e em torno de 19 m para as translações. Verifica-se tanto para o experimento 01 como para o experimento 02 que, as maiores discrepâncias estão relacionados com os problemas de alta rotação em  $\kappa$  e com a variação da coordenada H dos pontos que definem as feições retas no espaço-objeto, prejudicando a estimação do parâmetro  $Z_0$ . Neste experimento, houve uma melhora na determinação dos desvios-padrão para as rotações, comparado com o experimento anterior. O fato pode ser explicado devido à rotação em  $\kappa$  ser relativamente menor que a rotação em  $\kappa$  da imagem 4216.

Sendo assim, pode-se dizer que, a rotação em  $\kappa$  é um fator limitante para a convergência do filtro de estimação, uma vez que no primeiro experimento para a imagem 4216 a rotação em  $\kappa$  foi em torno de 300<sup>0</sup> e os resultados apresentaram um erro em torno de 4<sup>0</sup> (ver Tab. 31), porém, neste experimento a dervia é em torno de 115<sup>0</sup> apresentando um erro significativamente menor, apesar do parâmetro  $\kappa$

apresentar uma divergência em torno de  $6^0$  em relação ao parâmetro determinado por DELARA et al. (2004).

Como a rotação em  $\kappa$  da imagem deste experimento é relativamente menor que a rotação em  $\kappa$  apresentada no experimento anterior, será realizado um novo experimento ainda com a finalidade de entender melhor os resultados obtidos no experimento descrito para a imagem 4194. A Tabela 36 apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados e os resultados obtidos com o método proposto para o segundo experimento da imagem 4194.

TABELA 36 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – IMAGEM 4194 – EXPERIMENTO 2.

PARÂMETROS APROXIMADOS					
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
$112^0 15'36''$	$-4^0 36'31''$	$-4^0 47'31''$	678184,	7183990,	1677,
Precisões					
$0^0 03'12''$	$-3^0 30'00''$	$3^0 30'00''$	30,	-25,	30,
PARÂMETROS AJUSTADOS					
Método proposto		Desvio-padrão		DELARA et al. (2004)	Desvio-padrão
$\kappa$	$112^0 05'26''$	$0^0 03'03''$		$\kappa$	$0^0 03'12''$
$\varphi$	$-1^0 36'29''$	$0^0 04'32''$		$\varphi$	$0^0 18'49''$
$\omega$	$-1^0 39'33''$	$0^0 05'35''$		$\omega$	$0^0 22'37''$
$X_0$ (m)	678153,798	0,566		$X_0$ (m)	2,367
$Y_0$ (m)	7184009,389	0,712		$Y_0$ (m)	1,852
$Z_0$ (m)	1651,659	3,238		$Z_0$ (m)	0,481

Uma análise da Tabela 36 permite dizer que, a rotação em  $\kappa$  é um grande fator de divergência da solução, pois quando utilizado um ângulo de rotação  $\kappa$  com boa aproximação, todos os parâmetros obtiveram resultados mais próximos dos valores encontrados por DELARA et al. (2004), pois tanto os parâmetros como seus respectivos desvios apresentaram melhores resultados que os encontrados no experimento anterior, sendo para as rotações um desvio em torno de  $05'$  e para as translações em torno de 3 m.

Mesmo as discrepâncias entre os valores apresentaram-se mais refinadas, uma vez que para as rotações encontra-se maior discrepância em torno de 08' e para as translações de em torno de 4 m.

Uma conclusão importante é que o processo de correspondência automática e estimação dos parâmetros de orientação exterior atingem seus objetivos, conseguindo estabelecer automaticamente as correspondências entre as figuras planos, bem como determinar os parâmetros de orientação exterior da imagem. Ou seja, o processo apresenta uma metodologia totalmente automática, mas não apresenta características robustas e por muitas vezes não é eficiente. Porém, é bastante promissor, uma vez que os problemas apresentados abrirão um grande leque para a pesquisa. O uso de imagens de melhor qualidade e heurísticas mais apropriadas podem levar a um aumento na precisão dos resultados.

#### 4.2.3 Experimento 03 – dados reais

O objetivo deste experimento é apresentar o comportamento do método com o uso de uma imagem com ruas e rodovias expostas na parte inferior e superior da imagem. Ou seja, na região central da imagem não será possível reconstruir hipóteses em potencial, pois não existem ruas e/ou rodovias nesta região, tendo novamente uma distribuição não homogênea do apoio de campo. A imagem utilizada para este experimento é de número 4217 e a Figura 50 apresenta a região da imagem a ser orientada.

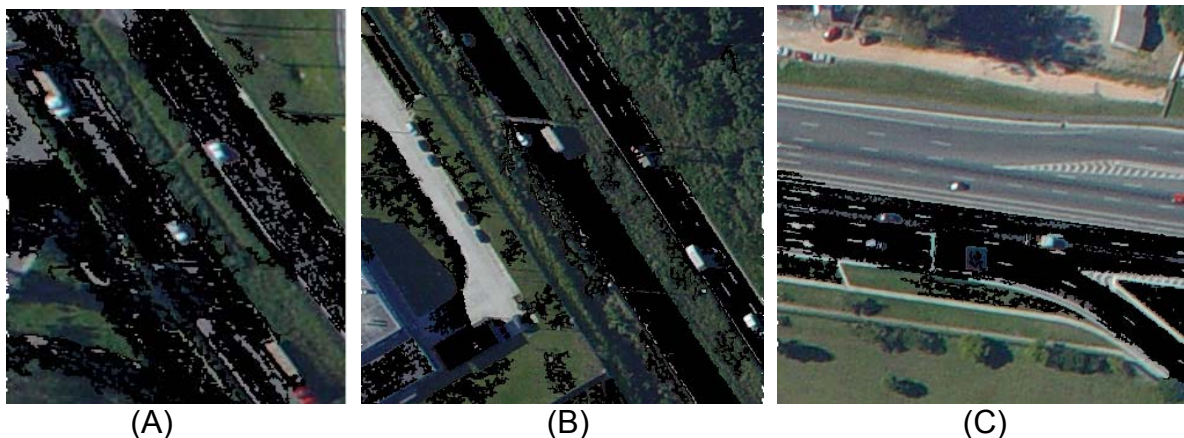


FIGURA 59 – IMAGEM ORIGINAL A SER ORIENTADA - 4217.



A Figura 51 apresenta os resultados obtidos com o processo de filtragem das regiões de Grubber recortadas automaticamente na imagem 4217.

FIGURA 51 – OBJETOS SEMÂNTICOS CLASSIFICADOS EM IMAGENS DIGITAIS - 4217.



Observando as Figuras 51a e 51b verifica-se que o processo de classificação automática dos objetos semânticos obteve sucesso. No entanto, na Figura 51c ocorreram falhas no processo de classificação, pois rodovias e/ou ruas



não foram classificadas. Pode-se ainda observar que apenas os objetos ruas e rodovias foram classificados pelo algoritmo. Aplicou-se então, os algoritmos de extração, verificação e convalidação de hipóteses de rodovia, nas imagens digitais e de intensidade.

O fato que as imagens de intensidade não apresentam projeções de sombras é um fator positivo na geração das hipóteses de rodovias no espaço-objeto. Isto é, a menor complexidade da cena apresenta vantagens na extração dos objetos sem problemas de quebra de continuidade na definição dos mesmos.

A Tabela 37 apresenta um resumo dos parâmetros das feições retas extraídas automaticamente da imagem digital 4217, sua parametrização e suas respectivas variâncias, bem como as coordenadas ENH de um dos pontos extremos das feições retas extraídas automaticamente na imagem de intensidade e seus respectivos cossenos diretores.

TABELA 37 – PARÂMETROS DAS FEIÇÕES RETAS, SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES, PONTOS EXTREMOS DAS FEIÇÕES RETAS EXTRAÍDOS NO ESPAÇO-OBJETO E OS COSSENOS DIRETORES - 4217.

reta	H/ V	a/a*	b/b*	$\sigma_a^2 / \sigma_{a^*}^2$	$\sigma_b^2 / \sigma_{b^*}^2$	E (m) 670000	N (m) 7180000	H (m)			
			(mm)		(mm)				l	m	n
0	V	0,384	3,186	1,188	2,676e-02	7464,43	4284,61	900,36	0,884	-0,465	0,012
1	H	-0,441	1,222	2,910e-01	3,875e-01	7471,76	4280,75	900,46	-0,408	-0,911	-0,044
2	V	0,273	2,923	8,917e-01	1,264e-02	7464,73	4264,20	899,71	-0,833	0,552	-0,018
3	H	-0,425	1,056	2,906e-01	3,261e-01	7457,25	4269,16	899,54	0,420	0,905	0,048

Gerados os objetos rodovia foram determinados os parâmetros de orientação exterior da câmara. A Tabela 38 apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões adotadas para este experimento. A Tabela 39 apresenta os parâmetros de orientação exterior da câmara ajustados pelo método proposto e os resultados obtidos por DELARA et al. (2004).

TABELA 38 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES - 4217.

Atitude			Posição (m)		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
314° 20'43"	4° 23'36"	3° 42'57"	677720,	7184400,	1664,
Precisões					
3° 30'00"	3° 30'00"	3° 30'00"	25,	25,	5,

TABELA 39 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – IMAGEM 4217.

Método proposto		Desvio-padrão		DELARA et al. (2004)		Desvio-padrão
$\kappa$	306° 35'080"	1° 25'08"		$\kappa$	311° 21'23"	0° 02'19"
$\varphi$	2° 23'14"	0° 42'07"		$\varphi$	1° 23'01"	0° 10'53"
$\omega$	5° 36'34"	0° 57'47"		$\omega$	0° 56'09"	0° 10'50"
$X_0$ (m)	677725,359	5,679		$X_0$ (m)	677695,089	1,457
$Y_0$ (m)	7184422,137	7,887		$Y_0$ (m)	7184375,744	1,463
$Z_0$ (m)	1667,605	4,894		$Z_0$ (m)	1659,847	0,337

De acordo com a Tabela 39 pode-se concluir que, o maior desvio encontrado para as rotações foi no parâmetro  $\kappa$  e para as translações o parâmetro  $Y_0$ . Como descrito anteriormente, as variações no parâmetro  $\kappa$  influenciam em maior grau o parâmetro  $Y_0$ . O parâmetro de rotação  $\omega$  divergiu, fato que não foi bem esclarecido.

Neste experimento houve tentativa de convergência do parâmetro  $Z_0$ , apresentando um desvio menor em relação aos resultados anteriores. Novamente a distribuição não homogênea do apoio de campo influenciou nos resultados obtidos.

Pode-se perceber que ocorreu uma divergência do parâmetro  $\kappa$  superior à precisão de valor inicial, explicado devido ao fato que uma falsa correspondência obtida não foi detectada pelo controle de qualidade e os dados eivados de erros propagaram-se para as demais correspondências prejudicando o funcionamento do filtro.

Novamente com a finalidade de entender melhor os problemas encontrados no experimento descrito foi considerado como parâmetro aproximado para a imagem

4217, o valor de ângulo de rotação  $\kappa$  estabelecido por DELARA et al. (2004). A Tabela 40 apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados do segundo experimento para a imagem 4217.

TABELA 40 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – 4217 – EXPERIMENTO 2.

Atitude			Posição (m)		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
$311^{\circ} 21' 23''$	$4^{\circ} 23' 36''$	$3^{\circ} 42' 57''$	677720,	7184400,	1664,
Precisões					
$0^{\circ} 02' 19''$	$3^{\circ} 30' 00''$	$3^{\circ} 30' 00''$	25,	25,	5,

Os resultados obtidos com o uso de uma boa aproximação para os parâmetros aproximados apresentaram-se piores que os resultados obtidos e apresentados na Tabela 39, explicado pela distribuição não homogênea do apoio de campo extraído para a imagem 4217.

#### 4.2.4 Experimento 04 – dados reais

Para avaliar o modo semi-automático da ferramenta desenvolvida foram realizados testes com a imagem 4215. Neste experimento, as hipóteses de rodovia, são reconstruídas através da coleta manual realizada pelo operador tanto na imagem digital quanto na imagem de intensidade, enquanto as correspondências são obtidas automaticamente. Neste procedimento as feições retas que definem os planos são extraídas manualmente e seus parâmetros e respectivas variâncias são calculados em função dos pontos extremos de cada feição reta coletada, a partir das Equações 49, 50, 51 e 52.

Foram coletados 35 hipóteses de rodovia na imagem digital e seus correspondentes na imagem de intensidade. A Tabela 41 apresenta um resumo dos parâmetros das feições retas coletadas na imagem digital 4215, sua parametrização e suas respectivas variâncias, bem como as coordenadas ENH de um dos pontos

extremos das feições retas coletadas na imagem de intensidade e seus respectivos cossenos diretores.

TABELA 41 – PARÂMETROS DAS FEIÇÕES RETAS, SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES, PONTOS EXTREMOS DAS FEIÇÕES RETAS EXTRAÍDOS NO ESPAÇO-OBJETO E OS COSSENOS DIRETORES - 4215.

reta	H/ V	a/a*	b/b*	$\sigma_a^2 / \sigma_{a^*}^2$	$\sigma_b^2 / \sigma_{b^*}^2$	E (m) 670000	N (m) 7180000	H (m)	l	m	n
0	V	0,384	3,186	1,188e-03	2,676e-02	7464,43	4284,61	900,36	0,884	-0,465	0,012
1	H	-0,441	1,222	2,910e-02	3,875e-01	7471,76	4280,75	900,46	-0,408	-0,911	-0,044
2	V	0,273	2,923	8,917e-02	1,264e-02	7464,73	4264,20	899,71	-0,833	0,552	-0,018
3	H	-0,425	1,056	2,906e-03	3,261e-01	7457,25	4269,16	899,54	0,420	0,905	0,048

A Tabela 42 apresenta os parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões adotadas para este experimento.

TABELA 42 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR APROXIMADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES - 4215.

Atitude			Posição (m)		
$\kappa$	$\phi$	$\omega$	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
315° 17'15"	4° 40'31"	3° 58'09"	677347,	7184141,	1672,
Precisões					
3° 30'00"	3° 30'00"	3° 30'00"	25,	30,	10,

A Tabela 43 apresenta os parâmetros de orientação exterior da câmara ajustados com uso do método proposto e os resultados obtidos por DELARA (2004).

TABELA 43 – PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR AJUSTADOS E SUAS RESPECTIVAS PRECISÕES – IMAGEM 4215.

Método proposto			DELARA et al. (2004)		
$\kappa$	313° 14'09"	0° 01'57"	$\kappa$	312° 18'05"	0° 03'00"
$\varphi$	1° 37'12"	0° 02'30"	$\varphi$	1° 40'37"	0° 17'50"
$\omega$	0° 36'35"	0° 06'44"	$\omega$	0° 14'36"	0° 14'06"
$X_0$ (m)	677323,402	1,7050	$X_0$ (m)	677322,242	2.372
$Y_0$ (m)	7184110,095	1,0491	$Y_0$ (m)	7184111,451	1.959
$Z_0$ (m)	1667,272	0,6956	$Z_0$ (m)	1662,984	0.570
Discrepância entre os Métodos					
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$ (m)	$Y_0$ (m)	$Z_0$ (m)
1° 36'59"	0° 03'24"	0° 18'01"	1,12	1,64	5,28

De acordo com a Tabela 43 pode-se dizer que, os resultados apresentados mostraram-se compatíveis com os resultados obtidos por DELARA et al. (2004). Porém, apresenta uma discrepância na ordem de 1°36' na rotação em  $\kappa$  e 5.28 m na translação em  $Z_0$ . O uso do sistema no seu modo semi-automático apresentou resultados mais confiáveis, comparados com os resultados obtidos no seu modo automático. O parâmetro  $Z_0$  ainda apresenta resultados não satisfatórios, devido aos motivos já apresentados anteriormente.

O algoritmo de extração de feições retas e o algoritmo de construção automática de hipóteses de rodovia devem ser melhor investigados para que sejam apontadas todas as possíveis causas de erros que afetam a determinação automática dos parâmetros de orientação exterior da câmara. A maior evidência está relacionada com o fato do algoritmo de extração de feições retas não ser sofisticado o suficiente para contornar os problemas já apresentados.

A imagem de varredura laser não foi concebida para a finalidade proposta neste trabalho, porém, apresenta-se promissora na automação do processo. O problema de correspondência é dito mal-condicionado, ou seja, não apresenta uma solução robusta e eficiente para todas as situações. Por isso, o modo semi-automático ainda apresenta resultados mais confiáveis, mas não elimina a possibilidade de estudos para a solução de ferramentas autônomas.

#### 4.2.5 Análise das correspondências estabelecidas

Com a finalidade de avaliar a eficiência do processo automático de estabelecimento de correspondências, a seguir será realizada uma análise das correspondências obtidas pela ferramenta desenvolvida no seu modo automático.

O algoritmo desenvolvido atribui códigos a cada plano construído no espaço-imagem e no espaço-objeto. Desta forma, foi possível realizar uma contagem do número de falsas e verdadeiras correspondências estabelecidas a partir da aplicação do modelo de correspondência.

Um resumo dos resultados obtidos em função do número de falsas e verdadeiras correspondências estabelecidas, bem como o número de erros grosseiros detectados no processo de estimação dos parâmetros de orientação exterior da imagem são apresentados na Tabela 44.

**TABELA 44 – RESUMO DOS RESULTADOS DO PROCESSO DE CORRESPONDÊNCIA E DETECÇÃO DE ERROS GROSSEIROS.**

<b>Imagem</b>	<b>Número de falsas correspondências Estabelecidas</b>	<b>Número de falsas correspondências identificadas pela detecção de erros grosseiros</b>	<b>Número de Verdadeiras Correspondências Estabelecidas</b>	<b>Número de falsas correspondências identificadas pela detecção de erros grosseiros</b>
4216	130	130	24	0
4194	150	150	25	0
4217	47	39	5	1

Os resultados desta tabela nos permite afirmar que, em todos os experimentos ocorreu um número muito grande de falsas correspondências. Isto pode ser explicado pelo fato que, não foram definidos atributos suficientes para parametrizar as relações entre as hipóteses de rodovia.

Nos experimentos que envolveram as imagens 4216 e 4194, um número muito grande de falsas correspondências foram estabelecidas durante o processo de correlação. No entanto, o algoritmo de controle de qualidade das observações descartou essas correspondências com 100% de eficiência. Nestes experimentos foram estabelecidas 24 e 25 verdadeiras correspondências, respectivamente. As observações utilizadas para o processo de estimação possuem uma distribuição bastante heterogênea e refletiu nos resultados obtidos na  $\Sigma^p$ .

Na imagem 4217, 8 das 47 falsas correspondências estabelecidas não foram detectadas na análise estatística e foram utilizadas como verdadeiras correspondências no processo de estimação dos parâmetros e prejudicou totalmente os resultados obtidos. Como pode-se perceber na Tabela 41, apenas 5 planos de apoio de campo foram utilizados no processo, sendo uma das causas principais na determinação de resultados de baixa qualidade.

Para o experimento 4217 ocorreram vários problemas que não ficaram bem esclarecidos, pois além do algoritmo de detecção de erros grosseiros não indentificar algumas falsas correspondências, detectou erros grosseiros em uma correspondência considerada verdadeira, prejudicando ainda mais a distribuição do apoio de campo. O erro grosseiro detectado na verdadeira correspondência pode ser atribuído ao algoritmo de extração de feições retas não ter sido eficiente na extração, devido aos problemas já discutidos anteriormente.

#### 4.2.6 Análise dos resultados em função da qualidade geométrica das imagens

De acordo com os experimentos realizados, um dos maiores problemas no processo de automação da resseção espacial de imagens é a baixa eficiência do algoritmo de extração de feições retas implementado. Feições retas extraídas com baixa qualidade podem ser entendidas como feições pouco retas ou até mesmo feições retas muito pequenas. A qualidade geométrica das imagens digitais e de intensidade provocam desvios nas feições retas extraídas automaticamente devido ao efeito de *aliasing*.

Com a finalidade de analisar os desvios encontrados na extração automática das feições retas e apontar os problemas causados pelo efeito de *aliasing* nos resultados obtidos, a Tabela 45 apresenta a média das variâncias das observações

(parâmetros  $a$  e  $b$  da reta), extraídas na imagem digital para os experimentos 01, 02 e 03.

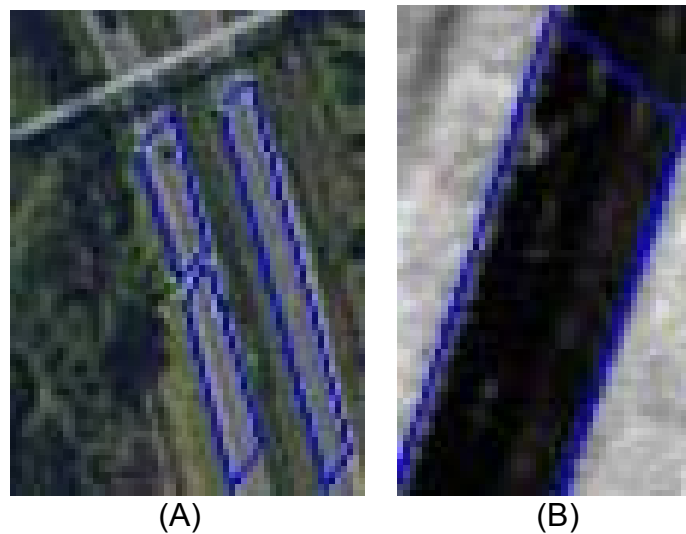
TABELA 45 – MÉDIA DAS VARIÂNCIAS DAS OBSERVAÇÕES PARA OS EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS.

Experimento	média	
	$\sigma_a^2 / \sigma_{a*}^2$	$\sigma_b^2 / \sigma_{b*}^2$ (mm)
01	0.020	0.0474
02	0.116	0.096
03	0.030	0.124

De acordo com a Tabela 45 pode-se dizer que, sendo o tamanho do pixel na imagem digital de  $5.4 \mu\text{m}$ , para o experimento 01 a média da variância para o parâmetro  $b$  da reta é de  $0.047 \text{ mm}$ , que corresponde a um erro na ordem de 8 pixels na medida do parâmetro  $b$  na imagem digital. Para o experimento 02, a média da variância para o parâmetro  $b$  da reta é de  $0.096 \text{ mm}$ , que corresponde a um erro na ordem de 17 pixels. Já para o experimento 03, a média da variância para o parâmetro  $b$  da reta é de  $0.124 \text{ mm}$ , que corresponde a um erro na ordem de 22 pixels. A Figura 52 apresenta o efeito de *aliasing* nas imagens digital e de intensidade.



FIGURA 52 – EFEITO DE *ALIASING* NAS IMAGENS DIGITAL E DE INTENSIDADE  
(A) IMAGEM DIGITAL; (B) IMAGEM DE INTENSIDADE.



Nota-se visualmente que, as bordas das feições retas extraídas não são geometricamente bem definidas na imagem digital e na imagem de intensidade. O efeito de *aliasing*, neste caso, pode fazer com que as feições extraídas sejam pouco retas e também podem causar uma variação na direção das mesmas. Neste caso, ocorrerá uma desestabilização dos vetores normais estabelecidos no modelo dos planos equivalentes, pois as direções das retas são deslocadas, assim como os próprios parâmetros da reta  $a$  e  $b$  sofrem variação.

Outro fator que explica a qualidade dos resultados dos parâmetros obtidos é o algoritmo de interpolação utilizado para gerar a grade regular da imagem de intensidade. A imagem de intensidade foi interpolada numa grade regular com 0.4 m de resolução. Porém, para a busca das coordenadas no arquivo bruto, muitos pontos não correspondiam a este valor e assim, foram tomados pontos com vizinhança de 0.8 m. Os algoritmos de interpolação e filtragem dos dados, provenientes do sistema, adicionam erros na imagem de intensidade. Por isso, existe a necessidade de implementar algoritmos próprios de filtragem sem a dependência dos algoritmos intrínsecos ao sistema.

No caso das imagens de intensidade existem erros sistemáticos que afetam a qualidade geométrica e radiométrica da imagem, bem como o posicionamento dos pontos coletados no terreno. Estes erros são provenientes do tipo de sistema de varredura laser, da atmosfera e topografia do terreno varrido, erros inerentes ao

receptor de navegação GPS e o sistema inercial. Cada fonte de erro apresenta peculiaridades distintas e devem ser estudados com pormenores. A melhora na resolução da imagem de intensidade irá provocar um crescimento considerável na metodologia proposta.